

**SINEKOLOGI PADANG LAMUN DAN  
MAKROINVERTEBRATA ASOSIATIFNYA PADA PERAIRAN  
DENGAN *MONSOONAL WAVE CLIMATE*: STUDI KASUS  
PULAU PANJANG KEPULAUAN DERAWAN**

**DISERTASI**



**Oleh :**

**MUHAMAD ROEM**

**NIM. 177080100111017**

**PROGRAM DOKTOR ILMU PERIKANAN DAN KELAUTAN  
MINAT TEKNOLOGI KELAUTAN**

**PROGRAM PASCASARJANA  
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG  
2021**

**SINEKOLOGI PADANG LAMUN DAN  
MAKROINVERTEBRATA ASOSIATIFNYA PADA PERAIRAN  
DENGAN MONSOONAL WAVE CLIMATE: STUDI KASUS  
PULAU PANJANG KEPULAUAN DERAWAN**

**DISERTASI**



Oleh :

**MUHAMAD ROEM**

**NIM. 177080100111017**

**PROGRAM DOKTOR ILMU PERIKANAN DAN KELAUTAN  
MINAT TEKNOLOGI KELAUTAN**

**PROGRAM PASCASARJANA**

**FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG**

**2021**



**SINEKOLOGI PADANG LAMUN DAN  
MAKROINVERTEBRATA ASOSIATIFNYA PADA PERAIRAN  
DENGAN MONSOONAL WAVE CLIMATE: STUDI KASUS  
PULAU PANJANG KEPULAUAN DERAWAN**

**DISERTASI**

**UNTUK MEMENUHI PERSYARATAN  
MEMPEROLEH GELAR DOKTOR**



Oleh :

**MUHAMAD ROEM**

**NIM. 177080100111017**

**PROGRAM DOKTOR ILMU PERIKANAN DAN KELAUTAN  
MINAT TEKNOLOGI KELAUTAN**

**PROGRAM PASCASARJANA**

**FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG**

**2021**



**SINEKOLOGI PADANG LAMUN DAN MAKROINVERTEBRATA  
ASOSIATIFNYA PADA PERAIRAN DENGAN MONSOONAL WAVE CLIMATE:  
STUDI KASUS PULAU PANJANG KEPULAUAN DERAWAN**

**DISERTASI**

Oleh :

Nama : Muhamad Roem  
NIM : 177080100111017  
Program Studi : Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan  
Minat : Teknologi Kelautan

Menyetujui

KOMISI PEMBIMBING  
Promotor

Prof. Ir. Yenny Risjani, DEA, Ph.D

Ko Promotor 1

Dr. Ir. Muhammad Musa, MS

Ko Promotor 2

Dr. Ir. H. Rudianto, MA

Mengetahui,  
Dekan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan  
Universitas Brawijaya



Prof. Dr. Ir. Maftuch, M.Si  
NIP. 196608251992031001



**IDENTITAS TIM PENGUJI**

**JUDUL DISERTASI** : Sinekologi Padang Lamun Dan Makroinvertebrata  
Asosiatifnya Pada Perairan Dengan *Monsoonal Wave*  
*Climate*: Studi Kasus Pulau Panjang Kepulauan  
Derawan

Nama Mahasiswa : Muhamad Roem  
NIM : 177080100111017  
Program Studi : Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan  
Minat : Teknologi Kelautan

**DOSEN PROMOTOR**

Promotor : Prof. Ir. Yenny Risjani, DEA, Ph.D  
Ko-Promotor 1 : Dr. Ir. Muhammad Musa, MS  
Ko-Promotor 2 : Dr. H. Rudianto, MA

**DOSEN PENGUJI**

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Diana Arfiati, MS  
Penguji 2 : Dr. Eng. Abu Bakar Sambah, S.Pi., MT  
Penguji 3 : Dr. Bagyo Yanuwadi  
Penguji Tamu : Prof. Ir. Budimawan, DEA., Ph.D

Tanggal Ujian : 13 juli 2021

## PERNYATAAN ORISINALITAS PENELITIAN DISERTASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah Disertasi ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Disertasi (DOKTOR) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundangundangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).



Malang, 13 Juli 2021

Mahasiswa

Muhamad Roem

NIM. 177080100111017





**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
PROGRAM PASCASARJANA**

21 0071 D



Nomor: 892/UN10.F40/PN/2021

Sertifikat ini diberikan kepada:

Nama : Muhamad Roem  
NIM : 177080100111017  
Program Studi : Program Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan  
Fakultas : Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan  
Universitas : Universitas Brawijaya

Dengan Judul **Disertasi**

**Sinekologi Padang Lamun dan Makroinvertebrata Asosiatifnya Pada Perairan  
Dengan Monsoonal Wave Climate: Studi Kasus Pulau Panjang Kepulauan  
Derawan**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya secara online pada tanggal **6 Juli 2021**  
dan dinyatakan **bebas plagiasi** dengan kriteria toleransi  $\leq 5\%$ .

Malang, 6 Juli 2021  
Ketua Badan Penerbitan Jurnal



Direktur

Prof. Dr. Marjono, M.Phil  
NIP. 196211161988031004

Indah Yanti, S.Si., M.Si.  
NIP. 19791129 200501 2 002

Disertasi ini dipersembahkan kepada:

Ibunda Fritje Patuti dan Ayahanda Abdul Fattah  
*Rahimahumullah Ta 'ala* sebagai salah satu bentuk bakti ananda

*Zaujaty* Masitah Rahayu Ningsih  
sebagai kado ulang tahun pernikahan ke 10

Teruntuk ananda tersayang Ikrimah Al Muwaffaq,  
Marwah Mahfudzah, Ahrar Al Aqhsa dan Adik-adik kalian kelak.  
Semoga kalian menjadi Anak Shalih dan penyejuk mata bagi kami.  
Suatu hari kalian pun akan menuliskan Ilmu yang kalian pelajari,  
amalkan dan ajarkan sebagai upaya menjadi insan yang bermanfaat  
di dunia dan mengantarkan pada kehidupan yang terhormat di akhirat.





## RIWAYAT HIDUP

Muhamad Roem dilahirkan pada 26 Dulqaidah 1403 H bertepatan dengan 4 September 1983 M di Tarakan.

Penulis merupakan putra pertama dari Abdul Fattah M dan Fritje Patuti, B.Sc. (*rahimahumullahu ta'ala*).

Menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SDN 003

Pamusian Tarakan, selesai tahun 1995; Sekolah

Menengah Pertama di SMPN 1 Tarakan, selesai tahun

1998; Sekolah Menengah Umum di SMUN 1 Tarakan

dan tamat pada tahun 2001. Gelar Sarjana Kelautan

diperoleh dari Program Studi Ilmu Kelautan Universitas Hasanuddin pada tahun

2007. Mulai bergabung di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas

Borneo sejak tahun 2008. Pada tahun 2010 penulis memperoleh kesempatan

untuk melanjutkan pendidikan pada Program Studi Pengelolaan Lingkungan

Hidup Konsentrasi Laut Dangkal dan Pantai Program Pascasarjana Universitas

Hasanuddin. Diterima sebagai CPNS di Universitas Borneo Tarakan pada tahun

2014. Selanjutnya pada tahun 2017 ditugaskan untuk mengikuti pendidikan

doktor di FPIK Universitas Brawijaya. Penulis memilih konsentrasi studi pada

minat Teknologi Kelautan dengan mengajukan disertasi berjudul Sinekologi

Padang Lamun dan Makroinvertebrata Asosiatifnya Pada Perairan Dengan

*Monsoonal Wave Climate*: Studi Kasus Pulau Panjang Kepulauan Derawan.





## UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji bagi Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang atas taufiq, hidayah dan inayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penulisan disertasi ini. Selama perkuliahan, penelitian dan penulisan disertasi penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menghaturkan terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada :

1. Pimpinan Universitas Borneo Tarakan, yang telah menugaskan penulis untuk melanjutkan pendidikan S3,
2. Pimpinan dan rekan-rekan civitas akademika Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Borneo Tarakan,
3. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia atas dukungan Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN),
4. Prof. Ir. Yenny Risjani, DEA, Prof. Dr. Ir. Muhammad Musa, MS dan Prof. Dr. H. Rudianto, MA yang dengan penuh kesabaran dan keikhlasannya telah memberikan bimbingan, arahan, nasehat, dan motivasi kepada penulis sejak penulisan proposal disertasi, pelaksanaan penelitian hingga penulisan artikel dan disertasi,
5. Prof. Dr. Ir. Diana Arfiati, MS, Dr. Eng. Abu Bakar Sambah, S.Pi., MT, dan Dr. Bagyo Yanuwadi M.Sc., sebagai tim penguji atas saran, masukan, koreksi dan bimbingan dalam penelitian,
6. Prof. Dr. Ir. Eddy Suprayitno, MS sebagai Wakil Rektor II Universitas Borneo Tarakan periode 2015 - 2017 sebagai orang pertama yang mempromosikan dan memotivasi untuk melaksanakan tugas belajar S3,
7. Ayahanda Prof. Ir. Budimawan, DEA, Ph.D atas bimbingan sejak S1, S2 dan kemurahan hati beliau untuk menjadi penguji tamu disertasi penulis.
8. Pimpinan, staf dan seluruh pengajar pada Program Studi Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan Universitas Brawijaya,
9. Ibu Marni Karim, ST Kabid Pentaan dan Penaatan PPLH Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Kalimantan Utara
10. Bapak Yafet Lenin, PS., S.Pi., MM Kepala Sekretariat Tim Teknis Komisi Penilai AMDAL Provinsi Kalimantan Utara
11. Bapak/Ibu anggota Tim Teknis Komisi Penilai AMDAL Provinsi Kalimantan Utara,
12. Keluarga besar Bapak Almarhum Ir. H. Burhanuddin Arifin, MM,





13. Dr. Muhammad Asfihannur Arifin, ST., MT beserta keluarga,
  14. Dr. Muhammad Ghufiron, S.Si., M.Si (FMIPA UB) beserta keluarga,
  15. Dr. Condro Puspo Nugroho, SP., MP (FP UB) beserta keluarga,
  16. Ustadz Intan Sumantri, BIRKH beserta keluarga,,
  17. Dr. Abigail Mary Moore dan Kurniati Umrah Nur, S.Si., M.AppSc (ME)  
Hons atas bantuannya dalam proses publikasi 2 artikel ilmiah,
  18. Segenap ikhwah dan asatidzah di Majelis Intelektual dan Ulama Muda  
Indonesia (MIUMI) Provinsi Kalimantan Utara, DPD Wahdah Islamiyah  
Kota Tarakan, SDIT Ibnu Abbas, DPD Hidayatullah Kota Tarakan, TK Ar  
Robbani, atas dukungan dan doa yang dilantunkan untuk penulis,
  19. *The Battle Proven Mariners* Indrawati Rukmana, Kiki Astriani, Ika Listina,  
Sarimah Sakka, Masita, Darnawati, Santi, Retno Setianingrum, Andi Niar,  
Affan, Noviani, Siti Mirsah, Nurhalisa, Irma Dayanti, Sergio Siahaan,  
Anugrah, dan Kamaruddin.
  20. Adikku Nurul Citra, Amd. Keb beserta suami,
  21. Kakak-kakakku di Donggala Hj. Nur Alam dan & Muhammad Darwis  
beserta seluruh keponakan dan cucu,
  22. Teman-teman Angkatan 2017 di program S3 FPIK UB, atas  
kebersamaannya dalam suka dan duka,
  23. Semua individu maupun institusi yang belum sempat disebutkan dalam  
kesempatan ini.
- Terima kasih kepada Istriku Masitah Rahayu Ningsih, S.Kom., *qurratu  
a'yunina* Ikrimah Al Muwaffaq, Marwah Mahfudzah, dan Ahrar Al Aqsha juga  
Abidatu 'Afifah dan Hurriyah Haqiqiyah. Akhirnya penulis memanjatkan do'a  
kepada Allah Azza wa Jalla untuk memberikan balasan yang berlipat ganda atas  
semua bantuan, kebaikan dan kelapangan yang telah diberikan kepada penulis  
dari berbagai pihak selama perkuliahan sampai selesainya disertasi ini. Amien.

Malang, Juli 2021

Jebat Erat,

Muhamad Roem



## KATA PENGANTAR

Ekosistem padang lamun mulai menjadi pusat perhatian dalam upaya pengelolaan pesisir dan pulau-pulau kecil di Indonesia dalam beberapa dekade terakhir. Berbeda dengan ancaman antropogenik yang menjadi perhatian banyak pihak, pergeseran dan intensifikasi perubahan pola iklim sebagai ancaman kronis terhadap kesetimbangan struktur, fungsi dan dinamika ekosistem laut kurang mendapatkan porsi kajian yang proporsional.

Tingginya keanekaragaman organisme yang menempati padang lamun terbentuk oleh kompleksitas struktur maupun fungsi padang lamun. *Ecological engineering capacity* dari lamun membentuk sistem habitat yang kompleks melalui fasilitas *trophic* dan *non-trophic* kepada berbagai biota asositifnya. Secara kumulatif asosiasi antara padang lamun dan makroinvertebrata membentuk sifat emergen yang membantu ekosistem beradaptasi terhadap variabilitas pada lingkungannya. Konektifitas dan interaksi skala lansekap antar ekosistem laut dangkal ditengarai sebagai mempengaruhi keberadaan dan keberlanjutan ekosistem padang lamun.

Disertasi ini berisi hasil penelitian mengenai dinamika padang lamun dan makroinvertebrata asosiatifnya yang alami (*pristine*) terhadap variabilitas fisik kimia perairan yang dibangkitkan oleh siklus musonal di Pulau Panjang Kepulauan Derawan. Keterbatasan pemikiran dan pengetahuan yang tertuang dalam naskah ini sangat membutuhkan koreksi, saran dan masukan dari Ibu/Bapak. Oleh karena itu, dengan kerendahan hati kami mengharapkan nasihat dan bimbingan Ibu/Bapak demi perbaikan naskah ini sebagai sebuah karya akademis.

Penulis



## RINGKASAN

MUHAMAD ROEM. Program Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya. Sinekologi Padang Lamun Dan Makroinvertebrata Asosiatifnya Pada Perairan Dengan *Monsoonal Wave Climate*. Studi Kasus Pulau Panjang Kepulauan Derawan. Dibimbing oleh Promotor Prof. Ir. Yenny Risjani, DEA., Ph.D., Ko-promotor Dr. Ir. Muhammad Musa, MS dan Dr. H. Rudianto, MA.

Padang lamun di reef flat Pulau Panjang Kepulauan Derawan merupakan ekosistem laut dangkal produktif dan habitat yang menopang keanekaragaman hayati yang tinggi. Sebagai bagian dari *Indonesia Maritime Continent* (IMC), Pulau Panjang berada dalam pengaruh siklus angin musonal. Sejauh ini belum tersedia informasi mengenai dinamika ekosistem (sinekologi) padang lamun beserta komunitas makroinvertebrata asosiatifnya yang berkaitan dengan siklus angin musonal.

Tujuan utama penelitian adalah untuk mendapatkan model dinamika padang lamun beserta komunitas makroinvertebrata asosiatifnya sebagai respon terhadap siklus musonal di Pulau Panjang Kepulauan Derawan. Guna mencapai hal tersebut, dirumuskan tujuan khusus antara lain; (1) Menganalisis pengaruh siklus musonal terhadap hidrodinamika perairan Pulau Panjang, (2) Menganalisis pengaruh siklus musonal terhadap fluktuasi musiman variabel fisik kimia perairan Pulau Panjang, (3) Menganalisis dinamika musonal ekosistem padang lamun Pulau Panjang, (4) Menganalisis dinamika musonal makroinvertebrata asosiatif padang lamun Pulau Panjang dan (5) Menganalisis keterkaitan komunitas makroinvertebrata dan padang lamun terhadap variabilitas lingkungan ekosistem padang lamun Pulau Panjang.

Pendekatan penelitian bersifat interdisipliner, pola angin dikaji dengan model *windrose* serta perhitungan indeks musonal yang selanjutnya ditransformasikan menjadi gelombang terbangkit angin. Kombinasi PERMANOVA (*Permutational Multivariate Analysis of Variance*) dan NMDS (*Non-metric Multi Dimensional Scaling*) digunakan untuk melihat dinamika antar musim keanekaragaman beta dari padang lamun dan komunitas makroinvertebrata. Kemudian untuk mengetahui keterkaitan antara parameter lingkungan terhadap padang lamun maupun komunitas makroinvertebrata diselidiki dengan teknik CCA (*Canonical Correspondence Analysis*).

Hasil analisis menunjukkan bahwa puncak Monsun Timur Laut (Desember-Maret) dan Monsun Barat Daya (Juni-September) berasosiasi dengan peningkatan intensitas dan tinggi gelombang membentuk *Monsoonal Wave Climate*. Analisis multitemporal menunjukkan bahwa siklus musonal memantik fluktuasi musiman sebagian variabel fisik kimia perairan ekosistem padang lamun Pulau Panjang. Dinamika fisik kimia perairan tersebut berkaitan dengan faktor intrinsik dan ekstrinsik setiap variabel. Penelitian menemukan 186 jenis Makroinvertebrata yang berasal dari 8 Kelas dan 64 Famili berasosiasi dengan 6 jenis vegetasi lamun di Pulau Panjang. Vegetasi lamun menunjukkan kestabilan kondisi antar musim sedangkan makroinvertebrata asosiatifnya menunjukkan kondisi yang sedikit variatif. Keanekaragaman beta makroinvertebrata pada Monsun Timur Laut berbeda terhadap Monsun Barat Daya dan kedua periode Transisi. Bagaimanapun dinamika padang lamun dan makroinvertebrata asosiatifnya berada pada kondisi yang relatif baik. Hal ini mengindikasikan tingginya kemampuan resistensi dan resiliensi ekosistem padang lamun, serta terjaganya keanekaragaman dan kelimpahan



makroinvertebrata pada level yang tinggi antar musim. Dengan demikian, interaksi mutualisme antara padang lamun dan komunitas makroinvertebrata di Pulau Panjang memfasilitasi kemunculan sifat kolektif dan sifat emergen yang meningkatkan resistensi, resiliensi dan adaptabilitas ekosistem terhadap fluktuasi kondisi lingkungan baik yang dipicu siklus monsunal secara langsung maupun tidak langsung.

Kata Kunci : Sinekologi, Padang Lamun, Makroinvertebrata, Monsoonal Wave Climate, Ekologi Numerik, Sifat Sibernetik Ekosistem





## SUMMARY

MUHAMAD ROEM. Doctoral Program in Fisheries and Marine Sciences, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Brawijaya University. Synecology of Seagrasses Ecosystems and Its Associative Macroinvertebrates in Waters With Monsoonal Wave Climate: A Case Study of Panjang Island, Derawan Islands. Supervised by Promoter: Prof. Ir. Yenny Risjani, DEA., Ph.D., Co-Promoter Dr. Ir. Muhammad Musa, MS., and Dr. H. Rudianto, MA.

Seagrass beds on the reef flat of Panjang Island, Derawan Islands are a productive shallow marine ecosystem and habitat that supports high biodiversity. As part of the Indonesia Maritime Continent (IMC), Panjang Island is under the influence of the monsoonal wind. To our knowledge, no information is available regarding the dynamics (synecology) of the seagrass ecosystem and its associative macroinvertebrate related to the monsoon wind cycle.

The main objective of the study was to obtain a model of the dynamics of seagrass beds and their associated macroinvertebrate communities in response to the monsoonal cycle on Panjang Island, Derawan Islands. In order to achieve this, specific objectives are formulated, among others; (1) Analyzing the influence of the monsoonal cycle on the hydrodynamics of the Panjang Island waters, (2) Analyzing the influence of the monsoonal cycle on seasonal fluctuations of physical and chemical variables in the waters of Panjang Island, (3) Analyzing the monsoonal dynamics of the Panjang Island seagrass ecosystem, (4) Analyzing the monsoonal dynamics of associative macroinvertebrates Panjang Island seagrass beds and (5) Analyzing the interrelationships of macroinvertebrate communities and seagrass beds on environmental variability of Panjang Island seagrass ecosystems.

The research approach is interdisciplinary, the wind pattern is studied using the windrose model and the calculation of the monsoon index which is then transformed into wind-generated waves. The combination of PERMANOVA (Permutational Multivariate Analysis of Variance) and NMDS (Non-metric Multi Dimensional Scaling) was used to examine the inter-seasonal dynamics of beta diversity from seagrass beds and macroinvertebrate communities. Then to find out the relationship between environmental parameters to seagrass beds and macroinvertebrate communities, it was investigated using the CCA (Canonical Correspondence Analysis) technique.

The results of the analysis show that the peaks of the Northeast Monsoon (December-March) and Southwest Monsoon (June-September) are associated with an increase in the intensity and height of the waves forming a Monsoonal Wave Climate. Multitemporal analysis shows that the monsoon cycle triggers seasonal fluctuations in some of the physical and chemical variables of the waters of the Long Island seagrass ecosystem. The physical and chemical dynamics of the waters are related to the intrinsic and extrinsic factors of each variable. The study found 186 types of macroinvertebrates from 8 classes and 64 families associated with 6 types of seagrass vegetation in Panjang Island. Seagrass vegetation shows stable conditions between seasons, while associative macroinvertebrates show slightly varied conditions. Beta diversity of macroinvertebrate in the Northeast Monsoon was different from that of the Southwest Monsoon and both Transitional periods. However, the dynamics of seagrass beds and their associative macroinvertebrates are in relatively good condition. This indicates the high resistance and resilience of the seagrass ecosystem, as well as the maintenance of diversity and abundance of



macroinvertebrates at high levels between seasons. Thus, the mutualistic interaction between seagrass beds and macroinvertebrate communities in Panjang Island facilitates the emergence of collective and emergent traits that increase the resistance, resilience and adaptability of the ecosystem to fluctuations in environmental conditions, either directly or indirectly triggered by monsoon cycles.

Key word : Synecology, Seagrass Beds, Macroinvertebrates, Monsoonal Wave Climate, Numerical Ecology, Cybernetics Nature







## DAFTAR ISI

**HALAMAN JUDUL**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**IDENTITAS TIM PENGUJI**

**PERNYATAAN ORISINALITAS PROPOSAL PENELITIAN DISERTASI**

**SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI**

**PERSEMBAHAN**

**RIWAYAT HIDUP**

**UCAPAN TERIMA KASIH**

**KATA PENGANTAR**

**RINGKASAN**

**SUMMARY**

**DAFTAR ISI**

**DAFTAR TABEL**

**DAFTAR GAMBAR**

**DAFTAR LAMPIRAN**

**DAFTAR LAMBANG, ISTILAH DAN SINGKATAN**

**BAB I PENDAHULUAN**

1.1 Latar Belakang

1.2 Rumusan Masalah

1.3 Tujuan Penelitian

1.4 Manfaat Penelitian

1.5 Hipotesis

1.6 Kebaruan (*Novelty*)

**BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

2.1 Vegetasi Padang Lamun

2.2 Habitat dan Distribusi Lamun

2.3 Karakter Vegetatif Lamun

2.4 Jenis-Jenis Lamun Di Indonesia

2.5 Urgensi dan Ancaman Terhadap Ekosistem Padang  
Lamun di Indonesia

Halaman

i

iii

iv

iv

vi

vii

viii

ix

xi

xii

xiv

xvi

xx

xxii

xxix

xxx

1

1

3

4

5

5

5

7

7

8

10

11

13



2.6 Makroinvertebrata dan Komunitas Asosiatif Padang Lamun	15
--	----

2.7 Pengelolaan Kawasan Konservasi Kepulauan Derawan	17
--	----

2.8 Meteorologi dan Klimatologi Benua Maritim Indonesia	20
---	----

2.9 Dinamika Monsunal Laut dan sumberdaya perikanan di Indonesia	23
--	----

2.10 Publikasi yang Berkaitan Dengan Rencana Penelitian	26
---	----

<b>BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN</b>	33
---	----

3.1 Kerangka Konseptual	33
-------------------------	----

<b>BAB IV METODE PENELITIAN</b>	37
---------------------------------	----

4.1 Tempat dan Waktu	37
----------------------	----

4.2 Alat dan Bahan	38
--------------------	----

4.3 Metode Pengumpulan Data	39
-----------------------------	----

4.3.1 Penentuan Stasiun Pengamatan	40
------------------------------------	----

4.3.2 Sampling dan Analisa Data Lamun	41
---------------------------------------	----

4.3.3 Sampling dan Analisa Data Makroinvertebrata	42
---	----

4.3.4 Identifikasi Sampel	44
---------------------------	----

4.3.5 Sampling dan Analisa Data Parameter Lingkungan	45
--	----

4.4 Analisis Data	52
-------------------	----

4.4.1 Analisis Angin Monsunal	52
-------------------------------	----

4.4.2 Analisis <i>Monsoonal Wave Climate</i>	55
--	----

4.4.3 Analisis Data Komunitas Lamun	62
-------------------------------------	----

4.4.4 Analisis Data Komunitas Makroinvertebrata	64
---	----

4.4.5 Analisis Data Parameter Fisik Kimia Perairan	66
--	----

4.4.6 Analisis Dinamika Musiman Variabel Fisik Kimia Perairan	70
---	----

4.4.7 Analisis Dinamika Musiman Komunitas Lamun dan Makroinvertebrata	70
---	----

<b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	75
-----------------------------------	----

5.1 Gambaran Umum Pulau Panjang dan Kepulauan Derawan	75
---	----

5.2 Geologi Regional dan Geomorfologi	76
---------------------------------------	----

5.3 Karakteristik Tekstual Sedimen Pulau Panjang	79
--	----



5.4 Karakteristik Klimatologi Pulau Panjang	84
5.4.1 Variabilitas Pola Angin Musiman	87
5.4.2 Interferensi Angin Monsunal	88
5.4.3 Kompleksitas Pola Angin Lokal	90
5.5 Karakteristik Hidro-Oseanografi Pulau Panjang	93
5.5.1 Pasang Surut dan Arus Pasang Surut	93
5.5.2 <i>Monsoonal Wave Climate</i>	96
5.6 Hidro-oseanografi dan Morfodinamika Reef Flat Pulau Panjang; Perspektif Sedimentology	106
5.6.1 Hidrolika Sedimen	107
5.6.2 Tipologi <i>Depositional Environment</i>	110
5.6.3 Morfodinamika Pantai	113
5.6.4 Distribusi Tekstur Sedimen dan Zonasi Padang Lamun	114
5.7 Dinamika Ekosistem Padang Lamun Pulau Panjang	116
5.7.1 Dinamika Monsunal Variabel Fisik dan Kimia Lingkungan	117
5.7.2 Dinamika Monsunal Komunitas Lamun	125
5.7.3 Dinamika Monsunal Komunitas Makroinvertebrata	131
5.8 Respon Komunitas Terhadap Dinamika Monsunal	135
5.8.1 Respon Komunitas Lamun	136
5.8.2 Respon Komunitas Makroinvertebrata	138
5.9 Resistensi dan Resiliensi Ekosistem	143
5.9.1 Adaptabilitas Terhadap Dinamika <i>Monsoonal Wave Climate</i>	144
5.9.2 Adaptabilitas Terhadap Variabilitas Kimiawi Perairan	149
5.9.3 Asosiasi dan Afinitas Spesies Ekosistem Padang Lamun	151
5.9.4 Asosiasi dan Interaksi Intra Jenis Lamun	152
5.9.5 Asosiasi dan Interaksi Intra Makroinvertebrata	156
5.10 Dinamika Lansekap Ekosistem Padang Lamun Pulau Panjang	160
5.10.1 Implikasi Seasonal Herbivory Grazing Terhadap Stabilitas Padang Lamun	166



5.10.2 Biogeokimia Sedimen Padang Lamun	170
5.10.3 Implikasi Proses Fisik-kimia Sedimen dan Makroinvertebrata Bentik Terhadap Padang Lamun	175
5.10.4 Implikasi Riverine Input dan Potensi Eutrofikasi Padang Lamun Pulau Panjang	177
5.11 Sintesis	180
5.11.1 Ekosistem Padang Lamun Pulau Panjang Dalam Konstelasi <i>Monsoonal Wave Climate</i>	180
5.11.2 Zonasi Padang Lamun Pulau Panjang	181
5.11.3 Mutualisme Lamun dan Makroinvertebrata	182
5.11.4 Dinamika dan Stabilitas Ekosistem Antar Monsun	183
5.11.5 Sifat Sibernetik Ekosistem Padang Lamun	187
5.11.6 Implikasi Bagi Pengelolaan Ekosistem dan Pertanyaan Penelitian Selanjutnya	188
<b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN</b>	190
6.1 Kesimpulan	190
6.2 Saran	191
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	192
<b>LAMPIRAN</b>	



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1 Jenis-jenis lamun yang tumbuh di perairan Indonesia.....	13
Tabel 2 Penelitian yang telah dilakukan terkait aspek klimatologi dan meteorologi.....	26
Tabel 3 Penelitian yang telah dilakukan terkait aspek hidrooseanografi.....	28
Tabel 4 Penelitian yang telah dilakukan terkait aspek dinamika padang lamun.....	29
Tabel 5 Peralatan yang digunakan dalam penelitian pengumpulan, analisis, dan pemrosesan data penelitian.....	38
Tabel 6 Bahan yang digunakan dalam penelitian.....	39
Tabel 7 Rujukan identifikasi organisme makroinvertebrata yang ditemukan.....	44
Tabel 8 Klasifikasi kisaran nilai potensial reduksi oksidasi ( $E_h$ ) di perairan menurut Odum (1993).....	49
Tabel 9 Kelas butir sedimen Skala Wentworth (1922), Friedman and Sanders (1978), GRADISTAT (Blott and Pye, 2001).....	50
Tabel 10 Ikhtisar variabel analisis.....	68
Tabel 11 Parameter sedimen Pulau Panjang.....	79
Tabel 12 Perbandingan persentase frekuensi distribusi angin antara Januari dan Juli menunjukkan indeks monsoon Khromov ( $I_{kh}$ ) berdasarkan frekuensi angin dominan dari arah yang berbeda sekurang-kurang $120^\circ$ .....	89
Tabel 13 Distribusi Frekuensi Periode Gelombang (%) Perairan di sekitar Pulau Panjang pada saat Monsun Timur Laut, Monsun Barat Daya dan Transisi.....	98
Tabel 14 Frekuensi count gelombang dari ke empat musim.....	104
Tabel 15 Ringkasan analisis sidik ragam (ANOVA) variabel fisik dan kimia dari sampel air kolom dan air pori sedimen dari 15 stasiun dan 4 musim di Pulau Panjang. Notasi huruf yang berbeda menyatakan perbedaan nyata berdasarkan Uji Posthoc Tukey dan Least Square Difference pada $\alpha = 0.05$ ( $n = 60$ ).....	117
Tabel 16 Jenis-jenis vegetasi lamun di Reef Flat Pulau Panjang.....	125



Tabel 17	Status ekologi padang lamun Pulau Panjang berdasarkan indeks Seagrass Ecological Quality Index (SEQI).....	126
Tabel 18	Kriteria nilai Stress dalam mengukur kepakaan model penskalaan multidimensional (Kruskal, 1964).....	131
Tabel 19	Ringkasan ANOVA kerapatan jenis (tegakan $m^2$ ) dan tingkat penutupan (%) vegetasi lamun dari 4 musim di Pulau Panjang. Notasi huruf yang berbeda menyatakan perbedaan nyata berdasarkan Uji posthoc Tukey dan Least Square Difference pada $\alpha = 0.05$ ( $n = 60$ stasiun).....	164
Tabel 20	Rerata potensial reduksi oksidasi dari penelitian terkait ekosistem padang lamun di beberapa negara Asia Tenggara	171





## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1 Keanekaragaman jenis lamun di daerah Indo-Pasifik Barat, intensitas warna yang semakin gelap menunjukkan tingginya keanekaragaman jenis (Waycott <i>et al.</i> , 2004).....	9
Gambar 2 Morfologi umum tumbuhan lamun (el Shaffai, 2011).....	10
Gambar 3 Sebaran status dan ancaman terhadap padang lamun di Indonesia (Unsworth <i>et al.</i> 2018).....	14
Gambar 4 Sebaran spasial klasifikasi resiko ekosistem di Berau Continental Shelf (BCF) Tarya <i>et al.</i> (2018).....	15
Gambar 5 Kepulauan Derawan dimana area abu-abu merupakan pulau dan reef flat terumbu yang sebagian tertutup oleh hamparan padang lamun (PJ Pulau Panjang, RR Pulau Rabu-Rabu, DR Pulau Derawan, TB Karang Taba Binga, MSM Karang Masimbung, PN Karang Pinaka, SM Pulau Semama, BU Karang Buli Ulin, SG Pulau Sangalaki, KB Pulau Kakaban, MR Pulau Maratua (Tarya <i>et al.</i> , 2018).....	17
Gambar 6 Bagan arah angin di bulan (a) Januari/Monsun Timur Laut, (b) Juli/Monsun Tenggara (Wirjohamidjojo dan Sugarin, 2008).....	22
Gambar 7 Pembagian region tipe iklim utama dimana wilayah Indonesia tengah bagian utara (Timur Laut Kalimantan termasuk Pulau Panjang) tidak termasuk dalam salah satu tipe iklim dan diklasifikasikan beriklim ekuatorial/tidak mengenal musim hujan dan kemarau (Aldrian, 2008).....	22
Gambar 8 Kerangka konseptual rencana penelitian.....	35
Gambar 9 Peta lokasi penelitian di Pulau Panjang Kepulauan Derawan pengambilan sampling bulan Januari-Februari (Monsun Timur Laut), April-Mei (Peralihan), dan Agustus-September (Monsun Barat Daya) dan Nopember (Peralihan 2).....	37
Gambar 10 Sketsa plot pengamatan transek kuadrat di lapangan (a) plot transek kuadrat 50 x 50 cm, (b) plot transek kuadrat 10 x 10 m menggunakan tali plastik.....	41
Gambar 11 Skema proses sampling dan penanganan sampel makroinvertebrata.....	43
Gambar 12 Prosedur analisis Nitrat (NO <sub>3</sub> -N) metode Brucine (EPA, 1971).....	48
Gambar 13 Prosedur analisis fosfat secara asam askorbat berdasarkan SNI 06-6989.31-2005 (Badan Standardisasi Nasional 2005)....	49



Gambar 14	Bagan alir analisa tekstur sedimen.....	51
Gambar 15	Coverage Radar Cuaca Stasiun BMKG Tarakan, Kalimantan Utara. Radius sapuan Doppler Radar menjangkau sejauh 240 Km dari stasiun meteorologi bandar udara Juwata di Kota Tarakan (BMKG 2021).....	53
Gambar 16	Distribusi fetch (garis merah) pembangkitan gelombang Pulau panjang dari setiap arah mata angin dominan Garis-garis merah pada Googleearth™ menggambarkan <i>actual groundlength</i> dari panjang fetch pembangkitan gelombang sementara tabel menunjukkan hasil kalkulasi <i>effective fetchlength</i> .....	56
Gambar 17	Relasi kecepatan angin di laut dan di darat (Triatmodjo, 2008; 2009).....	58
Gambar 18	Skema langkah-langkah pemodelan gelombang berdasarkan metode hindcasting (CERC, 1984; USACE 2008, 2015).....	60
Gambar 19	Segitiga tekstur sedimen.....	67
Gambar 20	Kerangka analisis penelitian.....	73
Gambar 21	Peta Kawasan Konservasi Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil Kepulauan Derawan Dan Perairan Sekitarnya Di Kabupaten Berau Provinsi Kalimantan Timur sebagaimana dalam Lampiran II: Keputusan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia Nomor 87/Kepmen-Kp/2016.....	76
Gambar 22	Peta Geologi Tarakan Basin yang terdiri dari 4 Sub-Basin yaitu Tidung, Tarakan, Berau, Muara. Pulau panjang berada pada Bagian Selatan Sub-Basin Tarakan berbatasan dengan Bagian Utara Sub Basin Muara dimodifikasi dari Suwarna dan Hermanto 2007.....	78
Gambar 23	Peta Kepulauan Derawan di Kabupaten Berau Provinsi Kalimantan Utara. Garis putus-putus kuning menunjukkan deretan pulau dan karang membentuk formasi terumbu karang penghalang (Barrier Reef) dimodifikasi dari de Voogd, (2009).....	79
Gambar 24	Parameter tekstural sedimen permukaan reef flat Pulau Panjang (a) mean, (b) skewness, (c) sorting and (d) kurtosis, dalam satuan $\phi$ (phi) beserta klasifikasi kategori deskriptifnya..	80
Gambar 25	Segitiga tekstur (GSM) sedimen Pulau Panjang berdasarkan klasifikasi Blott & Pye 2012.....	81
Gambar 26	Hubungan antara tingkat kematangan tekstural dan klasifikasi tingkat sortasi, digambar kembali berdasarkan (Folk 1974).....	83



Gambar 27	Windrose (Mawar Angin) bulanan dari wilayah yang dikaji notasi huruf berurut secara alfabetis menunjukkan urutan bulan Kalender Gregorian (Januari - Desember).....	86
Gambar 28	Windrose musiman (a) DJF bulan Desember, Januari Februari mewakili periode Asian Winter Monsoon; (b) MAM bulan Maret, April, Mei mewakili periode Transisi 1, (c) JJA bulan Juni, Juli, Agustus mewakili periode Australian Summer Monsoon, and (d) SON bulan September, Oktober, Nopember, mewakili periode Transisi 2.....	87
Gambar 29	Delineasi daerah pola iklim monsoonal kurva tertutup menunjukkan kawasan yang memenuhi kriteria Monsoonal Khromov sementara kotak persegi membatasi daerah Monsoon (Ramage, 1971).....	90
Gambar 30	Perbandingan persentase frequency distribusi arah angin pada periode DJF (garis biru diamond), MAM (garis kotak oranye), JJA (garis abu-abu segitiga), dan SON (garis kuning silang) tahun 2016-2018. Area elips berarsir menunjukkan dominansi Sea Breeze (A) dan interaksi antara Sea Breeze terhadap Asian Monsoon (B), dan Australian Monsoon (C).....	91
Gambar 31	Pola pergerakan angin (a) Asian Winter Monsoon, ketika angin mendekati khatulistiwa terjadi pembelokan sehingga arahnya dari Barat Laut hingga Timur Laut, (b) Australian Summer Monsoon, ketika angin mendekati khatulistiwa terjadi pembelokan sehingga arahnya dari Selatan hingga Barat Daya.....	92
Gambar 32	Grafik pasang surut di Kepulauan Derawan selama 15 piantan (1 piantan = 25 jam pengamatan) (Roem et al., 2015).....	94
Gambar 33	Peta Arus Pasang Surut di Sekitar Pulau (a) vektor arus menuju kondisi pasang (a) vektor arus menuju surut.....	94
Gambar 34	Grafik hubungan antara Pasang surut dan Arus Pasang Surut di Kepulauan Derawan (Roem et al., 2015).....	95
Gambar 35	Waverose (Mawar Gelombang) musiman dari perairan Pulau Panjang (a) Monsun Timur Laut (b) Monsun Barat Daya dan (c) Periode transisi 1 dan 2 digabungkan menjadi 1.....	96
Gambar 36	Klasifikasi gelombang lautan berdasarkan frekuensi, periode dan tingkat energi (Holthuijsen, 2007).....	99
Gambar 37	Model distribusi tinggi gelombang signifikan ( $H_{m0}$ ) di sekitar Pulau Panjang (a) Monsoon Timur Laut, (b) Monsoon Barat Daya, dan (c) Transisi 1 dan 2 digabungkan.....	100
Gambar 38	Diagram CM sedimen permukaan reef flat Pulau Panjang.....	108
Gambar 39	Distribusi hasil analisis sedimen permukaan reef flat Pulau	



	Panjang pada Stewart diagram dimana nilai sortasi di plot median dalam satuan $\phi$ .....	110
Gambar 40	Pembagian tiga zona terumbu karang di Berau Barrier Reef (Inner Shelf, Middle Shelf dan Outer Shelf) berdasarkan posisi relatif terhadap gugusan terumbu penghalang dan batimetri perairan. (a) cross section A-A' dan B-B', (b) cross section A-A' menunjukkan dua zona yakni Inner Shelf dan Outer Shelf, (c) cross section B-B' menunjukkan tiga zona yakni Inner Shelf, Middle Shelf dan Outer Shelf.....	111
Gambar 41	Diagram Segitiga Stewart menunjukkan hubungan karakter tekstural reef flat Pulau Panjang dengan profil/proses energi hidrodinamis yang bekerja pada lingkungan Inner Shelf.....	112
Gambar 42	Plot mean butir sedimen ( $\phi$ ) terhadap profil kemiringan pantai (Diagram Flemming) menunjukkan karakter morfodinamik reef flat Pulau Panjang.....	113
Gambar 43	Distribusi mean ( $\phi$ ) sedimen permukaan reef flat Pulau Panjang.....	115
Gambar 44	Grafik ANOVA sampel air kolom padang lamun Pulau Panjang. Notasi huruf yang berbeda menyatakan perbedaan nyata berdasarkan Uji posthoc Tukey dan Least Square Difference pada $\alpha = 0.05$ ( $n = 15$ ).....	118
Gambar 45	Grafik ANOVA sampel air pori sedimen padang lamun Pulau Panjang. Notasi huruf yang berbeda menyatakan perbedaan nyata berdasarkan Uji posthoc Tukey dan Least Square Difference pada $\alpha = 0.05$ ( $n = 15$ ).....	122
Gambar 46	Persentase tegakan/komposisi jenis (%) dan penutupan kanopi (%) padang lamun Pulau Panjang dari kedua Monsun (Timur Laut dan Barat Daya) serta periode Transisi 1 dan 2....	125
Gambar 47	Dinamika kerapatan total (tegakan/ $m^2$ ) padang lamun pulau panjang pada empat periode sampling ( $n=15$ sampling unit). Garis putus-putus menunjukkan trend fluktuasi dan stabilitas penutupan dari kelompok unit sampling (stasiun) berbeda (panah putus-putus biru stasiun stasiun 1-5 dan 12-15, panah putus-putus kelabu stasiun stasiun 6-12).....	127
Gambar 48	Dinamika tutupan kanopi (%) padang lamun Pulau Panjang pada empat periode sampling ( $n=15$ sampling unit). Garis putus-putus menunjukkan trend fluktuasi dan stabilitas penutupan dari kelompok unit sampling (stasiun) berbeda (panah putus-putus biru stasiun stasiun 1-4, panah putus-putus kelabu stasiun stasiun 5-12, panah putus-putus merah stasiun stasiun 13-15).....	128
Gambar 49	Skema partisi geometri untuk analisis PERMANOVA Makroinvertebrata dari 15 sampling unit pada 4 periode	



	sampling pada ruang Euclidean dua dimensi (bivariate). Ordinal Nonmetric multidimensional scaling (nMDS) dari sampling units berdasarkan ketidaksamaan Bray–Curtis pada kerapatan 6 jenis lamun dari total N = 60 sampling units di Pulau Panjang. Centroid dari ellips menunjukkan pusat tingkat kesamaan antar lokasi. Kesamaan simbol dan warna menunjukkan kelompok unit sampling dari musim yang sama...	130
Gambar 50	Komposisi jenis dan kelimpahan relatif Makroinvertebrata asosiasi Padang Lamun Pulau Panjang.....	132
Gambar 51	$\alpha$ -diversity (S, N, D, H' dan e) dari komunitas makroinvertebrata padang lamun Pulau Panjang dari kedua Monsun (Timur Laut dan Barat Daya) serta periode Transisi 1 dan 2.....	133
Gambar 52	Skema partisi geometri untuk analisis PERMANOVA Makroinvertebrata dari 15 sampling unit pada 4 periode sampling pada ruang Euclidean dua dimensi (bivariate). Ordinal Nonmetric multidimensional scaling (nMDS) dari sampling units berdasarkan ketidaksamaan Bray–Curtis dari Family macroinvertebrata dari total N = 60 sampling units di Pulau Panjang. Centroid dari ellips menunjukkan pusat tingkat kesamaan antar lokasi. Kesamaan simbol dan warna menunjukkan kelompok unit sampling dari musim yang sama...	134
Gambar 53	Diagram Canonical Correspondence Analysis (CCA) menunjukkan kecenderungan respon simultan vegetasi lamun terhadap gradien variabel lingkungan pada kedua monsun dan kedua periode peralihan. Titik hitam mewakili posisi stasiun, titik biru merepresentasikan posisi pusat kelimpahan vegetasi, garis mewakili variabel lingkungan dengan arah perpanjangan garis menunjukkan arah peningkatannya dalam skala eigen.....	137
Gambar 54	Diagram Canonical Correspondence Analysis (CCA) menunjukkan kecenderungan respon simultan komunitas makroinvertebrata terhadap gradien variabel lingkungan pada kedua monsun dan kedua periode peralihan. Titik hitam mewakili posisi stasiun, titik biru merepresentasikan posisi pusat kelimpahan vegetasi, garis mewakili variabel lingkungan dengan arah perpanjangan garis menunjukkan arah peningkatannya dalam skala eigen.....	139
Gambar 55	Plot Korespondensi Kanonis menunjukkan kecenderungan respon simultan vegetasi lamun terhadap tekstur sedimen (titik hitam menunjukkan stasiun; titik biru menunjukkan jenis lamun).....	145
Gambar 56	Plot Korespondensi Kanonis menunjukkan kecenderungan respon simultan vegetasi lamun terhadap gradien morfodinamika pantai (titik hitam menunjukkan stasiun; titik biru menunjukkan jenis lamun).....	146



- Gambar 57 Plot Korespondensi Kanonis menunjukkan kecenderungan respon simultan vegetasi lamun terhadap gradien pengaruh daratan (titik hitam menunjukkan stasiun; titik biru menunjukkan jenis lamun)..... 148
- Gambar 58 Model sebaran spasial dari zona dominan pengaruh daratan/sungai dan zona dominan pengaruh laut yang saling tumpang tindih di perairan Pulau Panjang berdasarkan diagram Canonical Correspondence Analysis (CCA) pada gambar 58..... 150
- Gambar 59 Model zonasi spasial lamun beserta species kunci penciri lingkungan yang potensial sebagai indikator spesies bagi pengelolaan..... 157
- Gambar 60 Ilustrasi konseptual pola distribusi dan asosiasi komunitas makroinvertebrata padang lamun Pulau Panjang. Warna menunjukkan kelompok fungsional, posisi menunjukkan preferensi habitat dan meingimplikasikan strategi survival..... 158
- Gambar 61 Sandwave merupakan bentuk *pathciness*/gangguan pada lansekap. Ukuran dan kontinuitas sandwave mengindikasikan tingginya tingkat energi hidrodinamika yang memindahkan sedimen. Sisi barat Pulau Panjang yang cenderung terlindungi memiliki tutupan kanopi yang tinggi dibanding daerah lainnya. a. Distribusi beberapa area sandwave di reef flat Pulau Panjang, b. ilustrasi turbulensi gelombang menyebabkan pergerakan sedimen, c dan d sandwave di sebelah tenggara Pulau panjang..... 161
- Gambar 62 Bentuk kenampakan fisik lansekap Padang Lamun berkaitan dengan hidrodinamika perairan (a) Gumuk pasir, (b) tepi batas luar lamun berdekatan dengan terumbu karang tepi (c) tebing terjal gumuk pasir, (d) blowout..... 163
- Gambar 63 Perbandingan kerapatan jenis (tegakan/m<sup>2</sup>) lamun. Notasi huruf yang berbeda menyatakan perbedaan nyata berdasarkan Uji posthoc Tukey dan Least Square Difference pada  $\alpha = 0.05$ ..... 165
- Gambar 64 a. Pola penggunaan habitat internesting Penyu Hijau di Kepulauan Derawan b. aktifitas bertelur/nesting c. tukik yang keluar setelah periode inkubasi (50-60 hari), d. aktifitas reproduksi e. aktifitas makan foraging..... 167
- Gambar 65 Diagram CCA padang lamun periode Monsun Barat Laut (Juni-September) menunjukkan jenis lamun *H. uninervis* yang dominan pada stasiun 6-12 mengandalkan uptake nutrient dari air pori sedimen. Pergeseran bugdet uptake nutrien menjadi dominan oleh akar dikarenakan penurunan biomassa daun akibat grazing oleh penyu hijau..... 169



Gambar 66	Kondisi konseptual lingkungan mikro dan mekanisme perlindungan lamun. Gradien warna berkaitan dengan rhizosphere yang menggambarkan konsentrasi relatif dari unsur/senyawa kimia (biru, oksigen; kuning, $H_2S$ ; merah, pH) Brodersen et al., (2015).....	172
Gambar 67	Zonasi bentik berdasarkan gradient oksigen yang menggambarkan hubungan dan mekanisme biogeokimia antara Potensial Reduksi Oksidasi/Eh (mV), konsentrasi total sulfid ( $\mu M$ ), terhadap proses metabolik dominan komunitas bentik dan kelompok taksonomis tumbuhan dan hewan bentik (Holmer, Wildish, and Hargrave, 2005).....	176
Gambar 68	Kisaran nilai variabel nutrient (NP) dari Sampel Air Kolom dan Air Pori Sedimen di Padang Lamun Pulau Panjang pada Skala Tingkat Trofik Perairan Padang lamun menurut (Lapointe, Tomasko, and Matzie 1994).....	177
Gambar 69	Skenario pergeseran spesies antara dominasi/kelimpahan jenis/kelompok produser primer terhadap pergeseran status trofik perairan akibat peningkatan nutrisi (Fourqurean 2014; Fourqurean and Rutten 2003).....	178
Gambar 70	Model konseptual sinekologi padang lamun beserta makroinvertebrata asosiatifnya kaitannya dengan siklus monsun di Pulau panjang Kepulauan Derawan.....	186



**DAFTAR LAMPIRAN**

- Lampiran 1 Jenis-jenis lamun yang tumbuh di perairan Pulau Panjang
- Lampiran 2 Analisis Sampel Sedimen Permukaan Reef Flat Pulau Panjang
- Lampiran 3 Hasil analisis distribusi frekuensi angin bulanan
- Lampiran 4 Hasil analisis distribusi frekuensi angin musiman
- Lampiran 5 Daftar jenis-jenis makroinvertebrata padang lamun Pulau Panjang
- Lampiran 6 Daftar pengukuran arus Pulau Panjang
- Lampiran 7 Perhitungan panjang Fetch Efektif
- Lampiran 8 Hasil analisis distribusi frekuensi tinggi ombak musiman
- Lampiran 9 Hasil analisis ANOVA parameter fisik dan kimia perairan Pulau Panjang
- Lampiran 10 Data kepadatan dan tutupan padang lamun Pulau Panjang beserta analisis SEQI
- Lampiran 11 Output Analisis PERMANOVA + NMDS Padang Lamun
- Lampiran 12 Output analisis keanekaragaman alfa makroinvertebrata
- Lampiran 13 Output Analisis PERMANOVA + NMDS makroinvertebrata
- Lampiran 14 Output Analisis CCA Padang Lamun
- Lampiran 15 Output Analisis CCA Makroinvertebrata
- Lampiran 16 Output Analisis CCA Respon terhadap jenis dan tekstur sedimen, morfodinamika pantai serta jarak dari pantai



## DAFTAR ARTI LAMBANG, SINGKATAN DAN DEFINISI

### Lambang/Singkatan

### Arti dan keterangan

Sinekologi

Studi ekologi yang memfokuskan pada dinamika, asosiasi, struktur, dan komposisi komunitas (tidak hanya terbatas pada spesies-spesies tertentu), yang bergabung menjadi satu kesatuan dan saling berinteraksi dalam daerah tertentu.

Monsoon

Monsoon (Monsun) berasal dari bahasa arab "*Mausam*", yang berarti musim. Monsun merupakan siklus angin musiman antar benua yang ditandai pembalikan arah angin dominan sekurang-kurang 120° antara bulan Januari dan Juli/Agustus

Indonesia maritim

Benua Maritim Indonesia; istilah yang di populerkan oleh Ramage (1968) untuk menggambarkan karakteristik dan kepentingan Kepulauan Indonesia (termasuk singapura, malaysia, brunei dan sebagian filipina) dalam sirkulasi atmosfer skala global.

Continent

Parafiletik

Kelompok organisme yang berasal dari leluhur yang sama, tetapi hanya sebagian keturunannya yang dimasukkan, sementara sebagian lain dimasukkan dalam kelompok berbeda

Monsoonal/Monsunal

Sifat/kondisi musiman yang berkaitan dengan siklus monsun

Asian Winter  
Monsoon

Monsun Dingin Asia, ditandai dengan hembusan angin yang dingin dari Benua Asia menuju Benua Australia dan melintasi kepulauan Indonesia. Monsun Dingin Asia berhembus pada periode Desember, Januari Februari dan menyebabkan musim hujan di sebagian besar kepulauan Indonesia.

Australian Summer  
Monsoon

Monsun Kering Australia hembusan angin kering dari Benua Australia menuju Asia dan melintasi kepulauan Indonesia pada periode Juni hingga Agustus dan



	menyebabkan musim kemarau di sebagian besar kepulauan Indonesia.
Transition 1	Periode peralihan/interval antara Monsun Dingin Asia menuju Monsun Kering Australia, terjadi pada periode Maret-Mei.
Transition 2	Periode peralihan/interval antara Monsun Kering Australia menuju Monsun Dingin Asia, terjadi pada periode September-Nopember.
Monsun Timur Laut	North East Monsoon, Pola angin monsun lokal di timur laut Kalimantan yang terjadi pada periode Desember, Januari, Februari dan Maret
Monsun Barat Daya	South West Monsoon Pola angin monsun lokal di timur laut Kalimantan yang terjadi pada periode Juni, Juli, Agustus dan September
Monsoonal Wave	Iklim Gelombang Monsunal; pola peningkatan intensitas dan tinggi gelombang laut musiman yang berhubungan dengan siklus monsun
Climate	
ASTM	American Society for Testing and Materials
ECOMSED	Estuary, Coastal, Ocean and SEDiment, nama program pemodelan transpor sedimen yang diaplikasikan pada sungai, estuari, pesisir, dan laut.
eH	Potensial Reduksi oksidasi
Gradistat	Grain Size Distribution and Statistics
IBM SPSS	International Business Machines Corporation - Statistical Package for the Social Sciences
Ka	Kurtosis
Mac	Macintosh (Operating System)
NO <sub>3</sub> -N	Nitrat
PAST	Paleontological Statistics
PE	polyethylene
PO <sub>4</sub>	Fosfat
PVC	Polyvinyl chloride
SCUBA	Self-Contained Underwater Breathing Apparatus
Sk	Skewness
SNI	Standar Nasional Indonesia



SPL	Suhu Permukaan Laut
SST	Sea Surface Temperature
UV-vis	Ultra Violet visible/Ultra Violet sinar tampak
WRPLOT View	Wind Rose Plot View
$\alpha$	Alfa / Taraf Kepercayaan
$\emptyset$	Diameter
$\sigma$	Sortasi (tingkat pemilahan sedimen secara alami)
ITZC	Inter Tropical Convergence Zone; (PPAT – Pias Pumpun Antar Tropis) zona pengumpulan uap air untuk pembentukan awan
Sea Breeze	Angin Laut
Sediment Load	Angkutan beban sedimen
Nutrient Load	Angkutan beban nutrien
Eutrofication	Pengayaan Nutrien
Nutrient Budget	Kebutuhan/kestimbangan unsur hara
SSME	Sulu Sulawesi Marine Ecoregion
RZWP3K	Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil
Basin	Cekungan Region Geologi
Sub Basin	Unit Geologi setingkat dibawah Basin
Fault	Sesar, retakan pada kulit bumi yang terjadi akibat gaya endogen yang menekan dari dalam bumi; rekahan yang terjadi akibat pergeseran dua sisi yang satu terhadap yang lain
Uplift	Pengangkatan Massa/Blok Daratan akibat proses geologis
Sinklin	Struktur geologis lembah lipatan kulit bumi yang berlapis-lapis
Antiklin	Struktur geologis punggung lipatan kulit bumi yang berlapis-lapis
Continental Shelf	Dangkalan Benua; Zona geologi berupa daerah laut dangkal (0-200 m) sebagai peralihan antara daratan dengan lautan dalam (>200 m)
Berau Continental Shelf	Dangkalan Benua Berau
Inner Shelf	Zona bagian dalam sistem dangkalan benua



Middle Shelf	Zona bagian tengah sistem dangkalan benua
Outer Shelf	Zona bagian luar sistem dangkalan benua
Reef Flat	Rataan terumbu
Reef Edge	Batas tepi luar terumbu
Inner Reef	wilayah di dalam batas terumbu
Barrier Reef	Terumbu penghalang
Barrier Reef System	Gabungan terumbu penghalang yang membentuk formasi bersambung secara geologis dan terkoneksi secara ekologis dan oseanografis
Intertidal	Zona pesisir antara pasang tertinggi dan surut terendah
Sub tidal	Zona Pesisir dibawah surut terendah
Slope	Kemiringan dinyatakan dalam pderajat dan persen (rasio antara tinggi dan panjang antara 2 titik acuan)
Sedimen Biogenik	Sedimen Biclastik, berasal dari pelapukan organisme (cangkang dan patahan karang)
Mean Sedimen	rerata ukuran butir sedimen yang menjadi petunjuk kelompok jenis sedimen
Kurtosis	Ukuran kemencengan kurva sebaran partikel sedimen
Indonesia maritim	Benua Maritim Indonesia; istilah yang di populerkan oleh Ramage (1968) untuk menggambarkan karakteristik dan kepentingan Kepulauan Indonesia (termasuk singapura, malaysia, brunei dan sebagian filipina) dalam sirkulasi atmosfer skala global.
Continent	
Vector	Vektor Besaran yang memiliki nilai dan arah
Prevailing Wind	Arah datang angin yang frekuensi terbanyak
Dominan Wind	Arah datang angin dengan kekuatan dominan
Resultan	Penjumlahan gaya-gaya yang bekerja pada vektor yang mengakumulasi/membentuk nilai dan arah gabungan yang dapat berbeda dengan nilai dan arah dari masing-masing vektor
Variabilitas	Dinamika/Fluktuasi variabel yang disebabkan pengaruh eksternal/lingkungan luar sistem.
Diurnal Sea Breeze	Angin laut harian
Archetype	Pola Dasar
Northern hemisphere	Bagian Bumi disebelah utara khatulistiwa



Southern hemisphere	Bagian Bumi disebelah selatan khatulistiwa
Khatulistiwa	Garis lintang 0 derajat
Indeks	Bilangan tanpa satuan yang menunjukkan suatu informasi berdasar formula dan kriteria spesifik
Indeks Monsoon	Angka yang menunjukkan karakter pola angin monsoon
Delineasi	Batasan/ruang lingkup
Orografi	Karakteristik permukaan bumi yang berupa gunung dan lembah yang berkaitan dengan cuaca lokal
Cold Surges	Seruak Dingin
<i>mixed predominantly semidiurnal</i>	campuran cenderung harian ganda (tipe pasang surut)
Amplitudo	Amplitudo pasang surut : Selisih interval vertikal kedudukan muka air antara pasang dan surut pada suatu titik.
Angin	Udara yang bergerak, pergerakan udara relatif terhadap titik acuan
Densitas	Kepadatan jenis/rapat massa (Massa/Volume)
Spring Tide	periode Pasang purnama/puncak
Neap Tide	periode Pasang perbani/air mati
Piantan	Periode pengamatan pasang surut selama 25 jam
Menuju Pasang	Periode rentang waktu antara kedudukan air saat surut terendah hingga pasang
Menuju Surut	Periode rentang waktu antara kedudukan air saat pasang hingga surut
Propagasi	Perambatan pasang surut sepanjang permukaan dasar perairan dangkal
Friksi	Gesekan, pada pasang surut friksi menggambarkan gesekan akibat massa air saat melintasi sepanjang dasar laut
Shoaling effect	effect yang terjadi pada massa air yang diakibatkan berkurangnya kedalaman perairan sepanjang arah lintasan pergerakan massa air
Wave Climate	Iklim Gelombang; rerata distribusi dari tinggi, periode dan arah dari gelombang pada suatu lokasi dalam



	jangka waktu tertentu
Hm0	Tinggi gelombang signifikan berdasarkan kekuatan energi pembangkitnya
Fetch	Panjang jarak antara dua titik dimana angin berhembus tanpa mengalami perubahan arah dan kecepatan secara signifikan
Waverose	Mawar gelombang
DJFM	Desember, Januari, Februari, Maret (lihat Asian Winter Monsoon; Monsun Timur Laut)
AM	April-Mei (Lihat Transition 1)
JJAS	Juni, Juli, Agustus dan September (lihat Australian Summer Monsoon; Monsun Barat Daya)
ON	Oktober-Nopember (Lihat Transition 2)
Wind Generated wave	Gelombang terbangkit angin; dibatasi periode gelombang antara antara 1 – 20 detik
Hidrolika Sedimen	Karakteristik dan mekanisme pengangkutan sedimen
Rolling	Pengangkutan partikel sedimen melalui proses gelinding oleh pergerakan air/fluida
Suspensi	Pengangkutan partikel sedimen di kolom perairan
Quite water	Perairan dalam
Turbulensi	Perputaran, perputaran massa air maupun sedimen
Deposisi	Pengendapan sedimen
Depositional Environment	Lingkungan pengendapan sedimen
Wave Proses	Pengendapan Sedimen yang bersumber dari proses angkutan oleh gelombang
Surf Zone	Zona pantai dimana ombak meluncur setelah ombak pecah
River Proses	Pengendapan Sedimen yang bersumber dari proses angkutan oleh sungai
Overlay	Tumpang susun
Morfodinamika	karakter bentuk morfologi fisik pantai sebagai akumulasi dinamika semua energi yang bekerja pada pantai secara



Pantai	jangka waktu panjang
Monamis	(mon = tumbuhan), (ami = gelombang) gerakan tumbuhan seiring datang dan pergi, turun naiknya energi gelombang pergerakan daun lamun mengikuti irama osilasi gelombang
Atenuasi	Pelemahan secara gradual
Shear velocity	kecepatan geser
Morfometrik	karakteristik ukuran morfologi
Makroinvertebrata	Invertebrata berukuran makro, dalam penelitian ini makroinvertebrata adalah invertebrata berukuran > 3 mm
ANOVA	Analisis of variance/analisis sidk ragam
NO <sub>3</sub> -N	Nitrat
PO <sub>4</sub>	Fosfat
[ ]	Konsentrasi, dinyatakan dalam ppm atau gram per gram
[NO <sub>3</sub> -N <sub>columnwater</sub> ]	Konsentrasi nitrat pada air kolom perairan
[NO <sub>3</sub> -N <sub>porewater</sub> ]	Konsentrasi nitrat pada air pori sedimen/interstisial
[PO <sub>4</sub> <sub>columnwater</sub> ]	Konsentrasi fosfat pada air kolom perairan
[PO <sub>4</sub> <sub>porewater</sub> ]	Konsentrasi fosfat pada air pori sedimen/interstisial
ORP	Oxidation Reduction Potential, Potensial Reduksi Oksidasi, Potensial redoks, eH
eH	Oxidation Reduction Potential, Potensial Reduksi Oksidasi, ORP
TSS	Total Suspended Solid, Total Padatan Tersuspensi (gram per liter)
DO	Dissolved Oksigen, Oksigen terlarut, ppm
g/l	gram per liter
ITF	<i>Indonesian Throughflow</i> , Arus Lintas Indonesia, Sistem sirkulasi arus laut yang mengalir secara konstan dari samudera Pasifik menuju Samudera Indonesia melintasi





kepulauan Indonesia sebagai akibat perbedaan gradient tekanan

Laut Sulawesi Lautan luas yang secara geografis dibatasi oleh semenanjung utara Sulawesi pada bagian selatan, kepulauan Sangihe pada bagian Timur, Kepulauan Selatan Filipina pada bagian utara dan Pesisir timur laut kalimantan hingga Tanjung Mangkalihat

Selat Makassar Lautan diantara Pulau Sulawesi dan Kalimantan yang berbatasan dengan Laut Flores pada bagian selatan ditandai dengan Dewakang Sill, dan Pada bagian Utara berbatasan dengan Laut Sulawesi yang secara geografis dibatasi oleh garis khayal/imajiner antara Tanjung Mangkalihat dan Pulau Tuguan Toli-toli

Sill Punggungan dangkal dari dasar laut

CO<sub>2</sub> Karbondioksida

CaCO<sub>3</sub> Kalsium Karbonat

SEQUI Seagrass Ecological Quality Index

PERMANOVA Permutational Multivariate Analysis of Variate

PCoA Principal Covariate Analysis

NMDS Non Metric Multi Dimensional Scaling, Metode pentahbisan (ordinasi)

$\alpha$ -diversity Alfa Diversities, keanekaragaman di dalam areal tertentu seperti komunitas dan ekosistem dan biasanya diungkapkan dengan kekayaan jenis pada suatu unit sampling yang berukuran sempit (plot/stasiun)

$\beta$ -diversity Beta Diversities, ukuran keanekaragaman yang dihitung dengan membandingkan keanekaragaman spesies antar ekosistem atau berdasarkan gradien lingkungan atau berdasarkan perbedaan musim

H' indeks keanekaragaman shannon wiener

e indeks pemerataan shannon

D indeks simpson

CCA Canonical Correspondence Analysis, Analisis



	Korespondensi Kanonis
Bysus	Serabut dari beberapa jenis bivalvia yang berfungsi sebagai perlekatan terhadap sedimen/batuan dasar laut
symbiont	Organisme yang bersimbiosis
resistensi	(daya tahan komunitas terhadap suatu gangguan fisik kimia)
resiliensi	(daya pulih setelah mengalami suatu bentuk tekanan)
Shear stress	ukuran gaya gesek air terhadap penampang/permukaan yang dilaluinya
Drag force	Kondisi kekuatan tahanan yang terbentuk ketika massa air melintasi suatu penampang
SLA	Specific Leaf Area, rasio luas daun setiap jenis tumbuhan (lamun)
tidal junction	batas pengaruh pasang surut tertinggi di dalam sungai
Well-mixed Water Column	Kolom air laut dimana terjadi pencampuran sempurna/merata kandungan fisik atau kimia atau keduanya.
H <sub>2</sub> O	Air
Pioneer Species	Spesies yang bersifat perintis pada awal suksesi ekologis, dicirikan dengan pertumbuhan yang cepat dan biomassa yang kecil
Climax Species	Spesies yang berada pada kondisi stabil (akhir suksesi ekologis) dicirikan dengan pertumbuhan yang lambat dan biomassa yang besar
Putative	dugaan
Zonasi	<i>Self spatial arrangement</i> padang lamun sebagai respon jangka panjang terhadap variabilitas lingkungan dan dinamika nutrien
Eutrofikasi	Pengayaan nutrien
Absorpsi	Penyerapan
Adsorpsi	Perlekatan
Preferensi	Kecenderungan, pilihan
Canopy	Lebar tajuk
interstisial	Zona biologis dekat permukaan sedimen dasar laut berupa lubang maupun celah batuan yang mudah



	terbongkar sehingga organisme dapat masuk dan keluar
meiofauna	Fauna yang hidup di lubang atau celah-celah sedimen dekat permukaan dasar laut
bioturbasi	Istilah umum geologi untuk beragam gangguan terhadap sedimen yang menyebabkan sedimen berada dalam kondisi yang bergerak dan diolah secara fisik maupun kimia.
ekskavasi	penggalan fisik sedimen oleh biota
reworking	Pengolahan atau pergerakan sedimen oleh aktifitas biogenik di bawah permukaan sedimen oleh biota.
Bioirigasi	Proses (transport nutrient antara sedimen dan kolom air diatasnya melalui lubang ventilasi sifon gastropoda atau lubang habitat organisme seperti <i>neaxius achantus</i> (Strahlaxidae). Organismenya disebut bioirrigator.
non mobile epifauna	Fauna permukaan dasar laut yang tidak memiliki atau kemampuan pergerakannya sangat lamban misalnya pinnidae, echinoidea.
filter feeder	Organisme yang mendapatkan makanan dengan menyaring air melalui insangnya (bivalvia)
Artifisial	Buatan, non natural
Landscape/Lansekap	Bentang lahan dengan karakteristik ekoslogis yang seragam, proses ekologis pada lahan/daratan dengan skala luas (> 100 m).
Seascape	Bentang laut, istilah yang merujuk proses lansekap pada ekosistem laut.
Erosi	Pengikisan sedimen
Deposisi	Pengendapan sedimen
Sandwave	Pola bergelombang pada pasir akibat pengaruh arus dan gelombang
Blowout	Pola kekosongan/kebotakan di padang lamun disebabkan gerusan gelombang dan arus yang kuat dari satu arah secara berkesinambungan.
Lightflex	Pola garis kilau cahaya di dasar perairan akibat pembelokan sudut datang cahaya saat menabrak permukaan air



Persistensi	Inersia, kemampuan bertahan suatu system biologis terhadap fluktuasi lingkungan eksternal
Grazing	Perambanan, aktifitas mengkonsumsi hijauan oleh herbivore besar
Foraging	Pencarian bahan makanan
Turnover time	Waktu pulihnya tegakan lamun untuk mencapai suatu ukuran optimal setelah terpangkas.
Solubiloitas	Tingkat kemampuan untuk larut
Availabilitas	Tingkat ketersediaan (secara kimia kesiapan suatu unsur untuk terlibat dalam suatu reaksi atau persenyawaan)
riverine input	Input pengaruh sistem sungai terhadap sistem pesisir/laut.
Resistensi	Kecenderungan dan atau kemampuan sistem untuk mempertahankan struktur fungsional dan organisasinya untuk pulih setelah penyimpangan (perturbasi) atau gangguan (disturbansi) pada lingkungan.
Stabilitas ekologis (equilibrium)	Suatu ekosistem dikatakan memiliki stabilitas ekologi (atau keseimbangan) jika mampu kembali kepada keadaan setimbangnya setelah mengalami gangguan (resistensi) atau karakteristiknya tidak mengalami perubahan besar yang tidak terduga selama retnag waktu gangguan.
Stabilitas dinamis	Menggambarkan kondisi ekosistem yang stabil sepanjang rentang waktu tertentu
Resistensi	Kemampuan suatu sistem biologis untuk bertahan terhadap penyimpangan (perturbasi) atau gangguan (disturbansi) pada lingkungan.



## BAB I

## PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Lamun merupakan tumbuhan berbunga (*angiospermae*) monokotil yang hidup terendam di lingkungan laut dan estuaria pada wilayah tropik dan sub-tropik. Lamun terdiri atas sekelompok kecil tumbuhan yang berjumlah sekitar 60 spesies dan 12 genera (Green and Short 2003; Hemminga and Duarte 2000; Kuo, Cambridge, and Kirkman 2018; Short and Coles 2003; Waycott, McMahon, et al. 2004). Tumbuhan lamun membentuk kelompok ekologi dan bersifat parafiletik namun bukan kelompok taksonomi (den Hartog and Kuo 2006; Papenbrock 2012). Hal tersebut berimplikasi bahwa variasi antara famili lamun tidak selalu memiliki kekerabatan yang dekat (den Hartog and Kuo 2006). Tumbuhan lamun mengkoloni dasar perairan baik dalam komposisi tunggal maupun campuran beberapa jenis membentuk ekosistem padang lamun. Terdapat 13 jenis lamun yang ditemukan di perairan Indonesia yang berasal dari family Cymodoceae dan Hydrocharitaceae. Meski jumlah jenisnya sedikit, lamun memberikan fungsi dan peranan ekologis yang sangat signifikan (Short et al. 2006).

Padang lamun merupakan salah satu ekosistem laut dangkal yang produktif. Ekosistem padang lamun merupakan habitat berlindung, memijah, dan mencari makan berbagai organisme laut (Hyndes et al. 2018; Rudianto 2017; York et al. 2018). Interaksi organisme yang berasosiasi dengan padang lamun membentuk kompleksitas struktur dan kesetimbangan dinamis. Struktur ekosistem dapat bersifat *bottom up* dimana biodiversitas didukung oleh produktifitas padang lamun atau bersifat *top down* yang dikendalikan organisme konsumen dan predator. Keduanya dapat berlangsung simultan bergantung pada skala spasio-temporal dan hirarki ekologis dari kelompok biota yang terlibat



dalam interaksi tersebut (Hyndes et al. 2018; Nowicki, Fourqurean, and Heithaus 2018).

Kepulauan Derawan terletak di kawasan laut semi tertutup Sulu Sulawesi (Tomascik et al. 1997). Kepulauan Derawan berada dalam wilayah administrasi Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur, terdiri dari 31 pulau yang mayoritas tidak berpenghuni. Pulau yang berpenghuni adalah Pulau Derawan, Pulau Sangalaki, Pulau Balikpapan dan yang terbesar Pulau Maratua. Pulau Panjang merupakan salah pulau besar di Kepulauan Derawan namun tidak berpenghuni. Pulau seluas 444,2 Ha ini dikelilingi oleh *reef flat* (rata-rata terumbu) seluas lebih kurang 6.000 Ha. Terletak memanjang dari arah barat laut ke tenggara dengan sisi timur berhadapan dengan laut lepas sementara sisi barat berhadapan dengan daratan utama Pulau Kalimantan. Pulau ini memiliki ekosistem mangrove, padang lamun, dan terumbu karang yang alami karena minimnya aktifitas masyarakat di daratan maupun perairan pulau ini.

Masyarakat Kepulauan Derawan dan sekitarnya mengenal 2 musim yakni Musim Utara dan Musim Selatan, ditandai dengan hembusan angin kuat yang membangkitkan gelombang tinggi di perairan. Tarya *et al.* (2015) menjelaskan bahwa Kepulauan Derawan berada dalam pengaruh siklus monsun. Desember hingga Maret merupakan periode *Asian Winter Monsoon* dimana angin kuat dominan berhembus dari arah Timur Laut. Sementara itu *Australian Summer Monsoon* (Monsun Barat Daya) berlangsung pada Juni hingga September. Kedua monsun dipisahkan oleh periode transisi antara kedua monsun yakni Peralihan I (April-Mei) dan Peralihan II (Oktober dan Nopember). Tarya *et al.* (2015) menyebutkan pada kedua periode peralihan, angin berhembus lemah dengan arah acak. Dinamika monsun ini merupakan pola musiman *intra-annual* yang berlangsung reguler dan periodis setiap tahunnya (Williams et al. 2017).



Musim merupakan ciri penting yang mendasari keseluruhan sistem alamiah, dimana banyak aspek dari dinamika ekologi hanya dapat dipahami ketika latar musim turut dikaji (White and Hastings 2020). Pergiliran monsun merupakan pemantik variabilitas skala besar terhadap ekosistem terestrial dan akuatik. Di perairan Kepulauan Derawan puncak monsun dicirikan oleh peningkatan intensitas, frekuensi, dan durasi gelombang. Gelombang yang kuat memiliki daya rusak terhadap padang lamun secara langsung maupun tidak langsung (John, Shirlal, and Rao 2019; Luhar, Infantes, and Nepf 2017; Portillo 2014). Pada saat gelombang tinggi daun lamun dapat terpotong, terjadi resuspensi dan transportasi sedimen, peningkatan kekeruhan, dan pelepasan bahan organik sedimen (Koch et al. 2006; Portillo 2014). Dampak fisik mempengaruhi komponen kimia lingkungan, selanjutnya direspon secara biologis oleh lamun dan biota yang berasosiasi dengan padang lamun.

Sejauh mana dinamika antar musim berpengaruh terhadap dinamika ekosistem padang lamun membutuhkan kajian. Secara ekologis, resultansi dari interaksi seluruh faktor abiotik pada ekosistem padang lamun selain berpengaruh pada vegetasi lamun tentunya berimplikasi terhadap komunitas yang berasosiasi dengan lamun. Diduga terdapat variabilitas respon dan adaptabilitas dari komponen biologi dalam hal ini lamun dan makroinvertebrata asosiatifnya terhadap dinamika fisik dan kimia lingkungan perairan yang berkaitan dengan siklus monsun.

Guna memahami proses, faktor, mekanisme dan respon dinamis ekosistem terkait siklus monsun. Dilakukan penelitian mengenai Sinekologi Padang Lamun dan Komunitas Makroinvertebrata Asosiatifnya di Pulau Panjang Kepulauan Derawan sebagai implikasi terhadap siklus monsun.



## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dirumuskan masalah utama penelitian ialah bagaimana dinamika padang lamun beserta komunitas makroinvertebrata asosiatifnya sebagai respon terhadap siklus Monsunal di Pulau Panjang Kepulauan Derawan. Adapun masalah khusus terdiri dari :

1. Bagaimana pengaruh siklus Monsunal terhadap hidrodinamika perairan Pulau Panjang?
2. Bagaimana pengaruh siklus Monsunal terhadap fluktuasi musiman variabel fisik kimia perairan Pulau Panjang?
3. Bagaimana dinamika Monsunal ekosistem padang lamun Pulau Panjang?
4. Bagaimana dinamika Monsunal makroinvertebrata asosiatif padang lamun Pulau Panjang?
5. Bagaimana keterkaitan komunitas makroinvertebrata dan padang lamun terhadap variabilitas lingkungan ekosistem padang lamun Pulau Panjang?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian adalah mendapatkan model dinamika padang lamun beserta komunitas makroinvertebrata asosiatifnya sebagai respon terhadap siklus Monsunal di Pulau Panjang Kepulauan Derawan. Guna mencapai tujuan tersebut dirumuskan tujuan khusus sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh siklus Monsunal terhadap hidrodinamika perairan Pulau Panjang
2. Menganalisis pengaruh siklus Monsunal terhadap fluktuasi musiman variabel fisik kimia perairan Pulau Panjang
3. Menganalisis dinamika Monsunal ekosistem padang lamun Pulau Panjang



4. Menganalisis dinamika monsunal makroinvertebrata asosiatif padang lamun Pulau Panjang

5. Menganalisis keterkaitan komunitas makroinvertebrata dan padang lamun terhadap variabilitas lingkungan ekosistem padang lamun Pulau Panjang

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa :

1. Manfaat teoritis berupa ketersediaan data tentang dinamika padang lamun beserta komunitas makroinvertebrata terkait siklus angin dan gelombang monsun.
2. Manfaat praktis bagi pemerintah berupa ketersediaan informasi ilmiah yang dapat digunakan untuk mendukung manajemen, konservasi, dan perencanaan restorasi ekosistem laut dangkal khususnya padang lamun.

#### 1.5 Hipotesis

Siklus monsunal memicu hidrodinamika fisik dan variabilitas nutrisi di perairan Pulau Panjang yang mempengaruhi dinamika dan adaptabilitas ekosistem padang lamun beserta makroinvertebrata asosiatifnya.

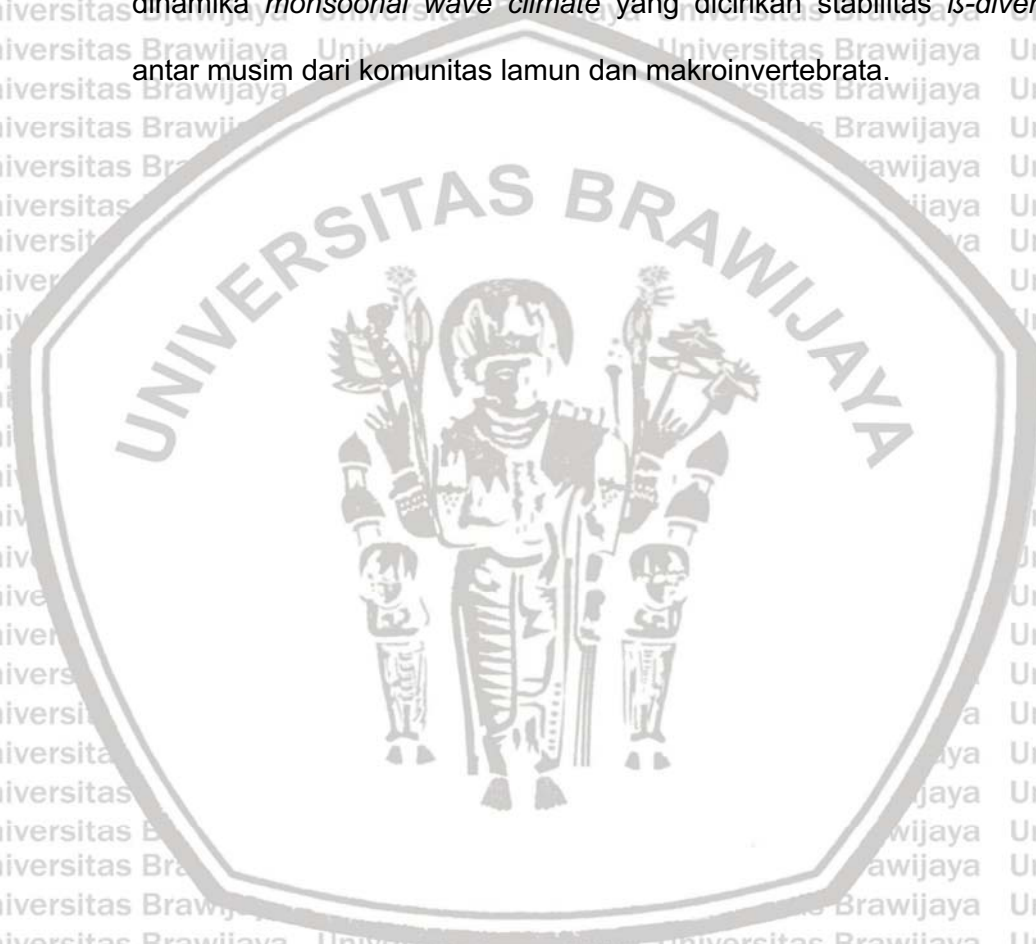
#### 1.6 Kebaruan (*Novelty*)

Kebaruan yang dihasilkan penelitian ini antara lain:

1. Penelitian ini merupakan yang pertama menunjukkan kompleksitas pola angin di pesisir Timur Laut Kalimantan dimana *Diurnal Sea Breeze* sebagai pola dasar (archetype) berkelindan dengan Angin Monsun yang berlangsung pada saat *Asian Winter Monsoon* dan *Australian Summer Monsoon*.



2. Dinamika gelombang perairan di Timur Laut Kalimantan termasuk dalam kategori *Monsoonal Wave Climate* yang dicirikan peningkatan intensitas dan tinggi gelombang yang dibangkitkan oleh angin dominan yang terjadi pada kedua Monsun.
3. Hasil penelitian ini juga menyediakan informasi mengenai keseimbangan dan adaptabilitas ekosistem padang lamun di Pulau Panjang terhadap dinamika *monsoonal wave climate* yang dicirikan stabilitas  $\beta$ -diversity antar musim dari komunitas lamun dan makroinvertebrata.





## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Vegetasi Padang Lamun

Secara taksonomi lamun merupakan satu-satunya kelompok tumbuhan berbunga yang hidup di laut (den Hartog and Kuo 2006; Larkum, Orth, and Duarte 2006; Tomascik et al. 1997). Menurut Larkum et al. (2006) lamun merupakan anggota dari kelompok *monocotyledons*. Kepmen LH No. 200 Tahun 2004 mendefinisikan lamun (*seagrass*) adalah tumbuhan berbunga (*Angiospermae*) yang hidup dan tumbuh di laut dangkal, mempunyai akar, rimpang (*rhizome*), daun, bunga dan buah dan berkembang biak secara *generatif* (penyerbukan bunga) dan *vegetatif* (pertumbuhan tunas). Kepmen LH No. 200 Tahun 2004 juga menyatakan bahwa padang lamun adalah hamparan lamun yang terbentuk oleh satu jenis lamun (vegetasi tunggal) dan atau lebih dari 1 jenis lamun (vegetasi campuran).

Beberapa karakteristik unik yang hanya dimiliki oleh tumbuhan lamun antara lain (Larkum et al. 2006; Papenbrock 2012);

- Hidup pada perairan estuari dan laut,
- Melakukan penyerbukan di dalam air dengan serbuk sari khas,
- Memproduksi benih atau bibit di dalam air yang dapat menyebar baik oleh agen biotik maupun abiotik,
- Memiliki sedikit kutikula daun dan sedikit stomata pada epidermis yang merupakan jaringan fotosintesis utama,
- Memiliki sistem perakaran rhizoma untuk mempertahankan posisinya dan perkembangan vegetatif,
- Memiliki akar yang mampu hidup pada lingkungan anoksik dan bergantung pada transport oksigen dari daun dan rhizoma tetapi juga penting dalam proses transfer nutrisi.



Secara harfiah, terjemahan *seagrass* dalam bahasa Indonesia adalah rumput laut. Oleh karena nama rumput laut telah lebih dahulu populer sebagai terjemahan dari *seaweed* yang dibudidayakan sebagai komoditas perdagangan maka diperlukan istilah spesifik untuk menyebut komunitas tumbuhan sejati perairan ini sebagai penyeragaman istilah dalam ilmu pengetahuan dan penyebutan sehari-hari (Atmadja, 1999). Malikusworo Hutomo adalah sosok yang pertama kali mempopulerkan istilah lamun sebagai padanan untuk *seagrass* melalui disertasi doktoralnya yang berjudul "Telaah Ekologi Komunitas Ikan Pada Padang Lamun di Teluk Banten" (Azkab 2006). Dari beberapa sumber diketahui bahwa kata lamun berasal dari bahasa Ambon "Lalamun".

den Hartog dan Kuo (2006) menyatakan lamun membentuk sebuah kelompok ekologi dan bukan kelompok taksonomi. Lebih lanjut den Hartog dan Kuo (2006) menambahkan bahwa hal tersebut berimplikasi bahwa variasi antara famili tumbuhan lamun tidak selalu memiliki kekerabatan yang dekat (den Hartog and Kuo 2006). Ekosistem lamun adalah satu sistem organisasi ekologi padang lamun yang di dalamnya terjadi hubungan timbal balik antara komponen abiotik (air dan sedimen) dan biotik (hewan dan tumbuhan) yang hidup berasosiasi dengannya.

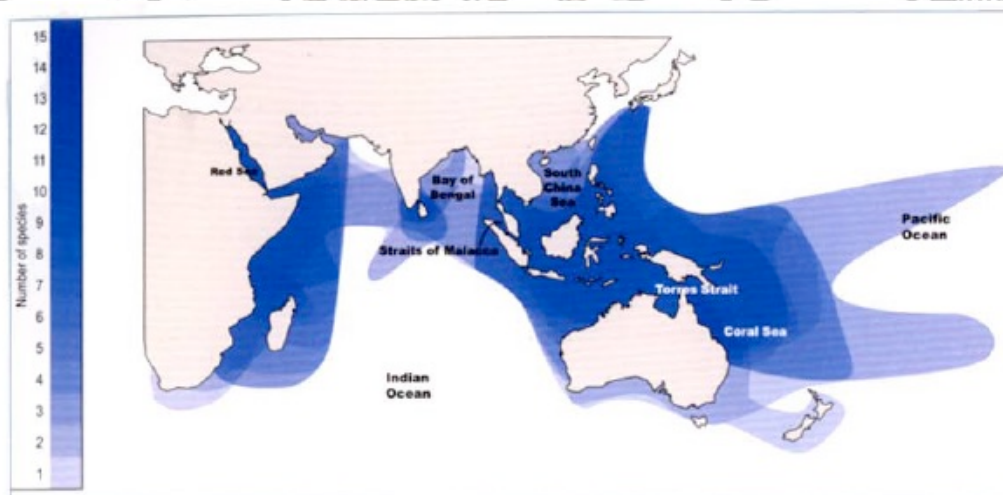
## 2.2 Habitat dan Distribusi Lamun

Tumbuhan lamun mampu tumbuh pada kedalaman dimana penetrasi cahaya matahari masih dapat menembus perairan serta menerima suplai nutrisi baik dari darat dan laut. Lamun umumnya tumbuh pada substrat dengan tekstur pasir, pasir lumpuran, lumpur-pasiran, lumpur lunak dan karang. Meski demikian, lamun masih dapat ditemukan tumbuh mulai dari zona pasut terendah sampai pada daerah subtidal dengan kedalaman hingga 40 m bahkan hingga 90 m



selama cahaya matahari masih mampu menembus perairan (den Hartog and Kuo 2006).

Waycott *et al.* (2004) menjelaskan bahwa ekosistem padang lamun dapat ditemukan pada hampir seluruh perairan dangkal di bumi. Secara geografis, semakin mendekati garis khatulistiwa maka jumlah jenis lamun semakin meningkat dan keanekaragaman jenis tertinggi ditemukan pada daerah indopasifik barat, termasuk Indonesia (gambar 1). Terdapat tujuh (7) genera lamun yang menghuni perairan tropis yaitu *Halodule*, *Cymodocea*, *Syringodium*, *Thalassodendron*, *Enhalus*, *Thalassia*, dan *Halophila*. Sedangkan lima (5) genera lamun yang menghuni perairan subtropics yaitu *Zostera*, *Phyllospadix*, *Heterozostera*, *Posidonia*, dan *Amphibolis*.



Gambar 1. Keanekaragaman jenis lamun di daerah Indo-Pasifik Barat, intensitas warna yang semakin gelap menunjukkan tingginya keanekaragaman jenis (Waycott, McMahon, et al. 2004)

Lamun yang tumbuh di perairan tropis terpusat pada dua wilayah yaitu daerah Indo Pasifik Barat sampai pantai Pasifik Amerika Tengah, dan Laut Karibia. Di Indopasifik Barat semua genera dapat ditemukan, sedangkan di Karibia hanya didapatkan empat (4) genera, yaitu *Halodule*, *Syringodium*, *Thalassia*, dan *Halophila* (Waycott, McMahon, et al. 2004).



### 2.3 Karakter Vegetatif Lamun

Kiswara dan Hutomo (1985), menjelaskan bentuk vegetatif lamun memperlihatkan karakter tingkat keseragaman yang tinggi. Hampir semua genera memiliki rhizoma yang sudah berkembang dengan baik dan bentuk daun yang memanjang (linear) atau berbentuk sangat panjang seperti ikat pinggang (belt), kecuali jenis *Halophila* memiliki bentuk lonjong. Lamun pada umumnya dianggap sebagai kelompok tumbuh-tumbuhan yang homogen, dengan keanekaragaman yang jelas pada sistem percabangan dan sistem anatominya.



Gambar 2. Morfologi umum tumbuhan lamun (el Shaffai, 2011)

Lebih lanjut Kiswara dan Hutomo (1985) menyebutkan, berdasarkan pada bentuk karakter sistem vegetatifnya lamun dapat dibedakan menjadi enam kelompok antara lain :

#### A. Herba, percabangan monopodial

- a. Daun panjang, berbentuk pita atau ikat pinggang, memiliki saluran udara.



1. Parvozoosterid, daun memanjang dan sempit : *Halodule* dan *Zostera* subgenus *Zosterella*.
  2. Magnozoosterid, daun memanjang atau berbentuk pita dan agak lebar : *Zostera* subgenus *Zostera*, *Cymodocea*, dan *Thalassia*.
  3. Syringodiid, daun bulat seperti lidi dengan ujung runcing (subulate) : *Syringodium*.
  4. Enhalid, daun panjang dan kaku seperti kulit (leathery linier) atau berbentuk ikat pinggang yang kasar : *Enhalus*, *Posidonia* dan *Phyllospadix*.
  - b. Daun berbentuk elips, bulat telur, berbentuk tombak (lanceolate) atau panjang, rapuh dan tanpa saluran udara.
  5. Halophilid : *Halophila*
- B. Berkayu, percabangan simpodial, daun tumbuh teratur di kiri dan kanan cabang tegak.
6. Amphibolid : *Amphibolis*, *Thalassodendron*, dan *Heterozostera*.

Berbagai variasi bentuk pertumbuhan tersebut mempunyai kaitan dengan perbedaan ekologis habitat lamun (Kiswara and Hutomo 1985).

## 2.4 Jenis-Jenis Lamun di Indonesia

Sebagaimana disebutkan sebelumnya bahwa pada dasarnya lamun merupakan kelompok fungsional ekologis dan bukan merupakan pengelompokan berdasarkan taksonomi dari angiospermae, oleh karena itu sebagai konsekuensinya perbedaan variasi dalam pengelompokan diantara famili lamun tidak selalu dikarenakan kekerabatan yang rapat. Sebagai contoh famili Hydrocharitaceae sebagian besar terdiri atas tanaman - tanaman air tawar, Sedangkan famili Cymodoceaceae, Posidoniaceae, dan Zosteraceae kesemuanya adalah tanaman air laut.



Berikut urutan penamaan spesimen lamun yang ditemukan di Indonesia

Kingdom : Plantae

Division : Magnoliophyta (Angiospermae)

Class : Liliopsida

Sub Class : Alismatidae

Order : Alismatales

Family : Hydrocharitaceae

Genus : *Enhalus*

*Halophila*

*Thalassia*

Order : Potamogetonales

Family : Cymodoceae

Genus : *Cymodocea*

*Halodule*

*Syringodium*

*Thalassodendron*

Secara umum jenis-jenis lamun yang ditemukan hidup di perairan Indonesia terbagi ke dalam 2 kelompok besar yaitu dari family Cymodoceae dan Hydrocharitaceae. Selama ini literatur tentang lamun di Indonesia menyebutkan bahwa jenis lamun yang hidup di perairan Indonesia sebanyak 12 jenis. Namun jumlah tersebut telah bertambah menjadi 13 jenis dengan ditemukannya 1 jenis lamun baru yang berasal dari Pulau Samalona di Kepulauan Spermonde dan diberi nama *Halophila sulawesii* (Kuo 2007). Tidak seperti lamun lainnya di Indonesia yang hidup pada perairan dangkal, *Halophila sulawesii* hidup pada kedalaman 30 meter.



Berikut disajikan deskripsi dari spesies lamun yang terdapat di perairan Indonesia :

Tabel 1. Jenis-jenis lamun yang tumbuh di perairan Indonesia

Family	Genus	Spesies
Cymodoceae	Cymodocea	<i>C. rotundata</i>
		<i>C. serrulata</i>
	Halodule	<i>H. pinifolia</i>
		<i>H. uninervis</i>
	Syringodium	<i>S. isoetifolium</i>
Hydrocharitaceae	Thalassodendron	<i>T. ciliatum</i>
	Enhalus	<i>E. acoroides</i>
		<i>H. decipiens</i>
		<i>H. minor</i>
	Halophila	<i>H. ovalis</i>
		<i>H. spinulosa</i>
		<i>H. sulawesii</i>
	Thalassia	<i>T. hemprichii</i>

## 2.5 Urgensi dan Ancaman Ekosistem Padang Lamun di Indonesia

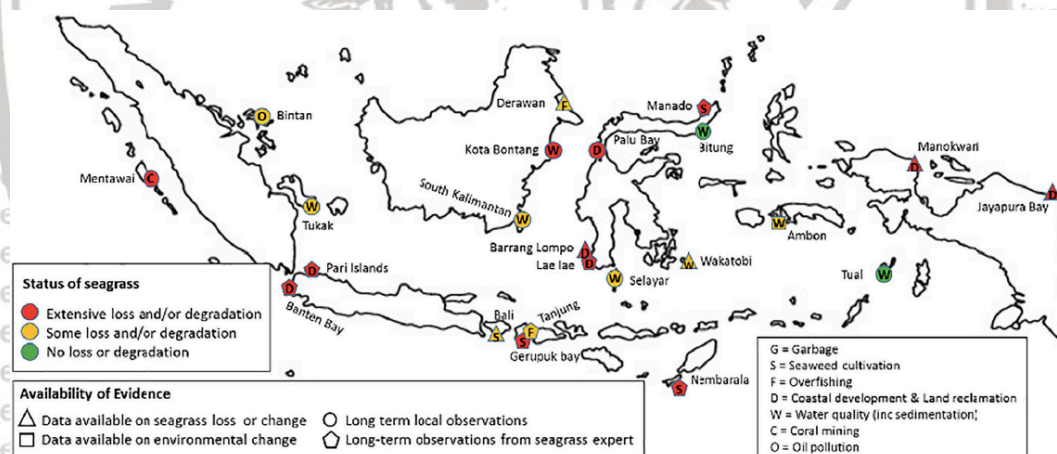
Keberadaan ekosistem lamun memainkan peranan sangat penting terhadap berbagai organisme. Bentuk-bentuk layanan ekosistem padang lamun (Costanza et al. 1997, 2014) antara lain adalah :

- Padang lamun merupakan produser primer penting dimana lamun dengan energi matahari mengubah karbondioksida secara efisien ke bentuk organik.
- Lamun menyediakan makanan dalam bentuk organik untuk beberapa jaring makanan yang saling berhubungan erat.
- Lamun menjaga kestabilan dasar perairan.
- Lamun membentuk struktur dasar perairan di tempatnya tumbuh menjadi sebuah lingkungan kompleks yang menyediakan tempat hidup untuk berbagai organisme.
- Lamun berperan sebagai daerah asuhan bagi beragam ikan ekonomis penting.



Padang lamun merupakan salah satu ekosistem yang paling produktif dan dinamis di dunia. Padang lamun berperan sebagai *ecological engginers* yang berpengaruh signifikan terhadap kondisi fisik, biologi dan kimia lingkungannya. Kompleksitas habitat yang dibentuknya memungkinkan hadirnya beragam jenis organisme. Jumlah organisme yang ditemukan pada daerah perairan berpasir yang ditumbuhi lamun 40 kali lebih banyak dari daerah berpasir yang tidak ditumbuhi lamun (McKenzie 2008).

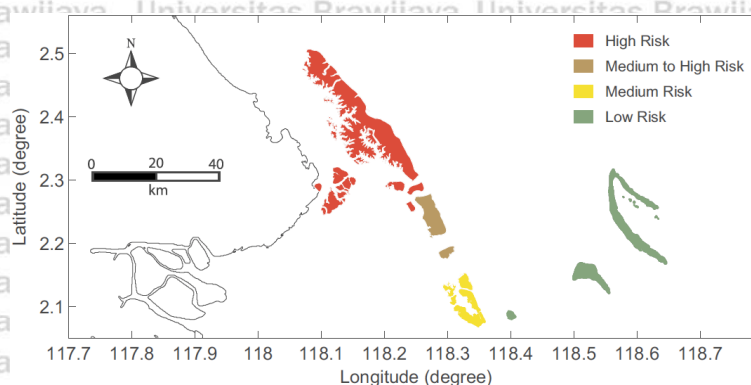
Keberlanjutan ekosistem ini harus dijaga mengingat tingginya nilai ekonomis yang dapat diberikan ekosistem ini bila dikelola dan dimanfaatkan secara tepat. Kesadaran akan pentingnya ekosistem padang lamun dalam menopang kesejahteraan perlu dikampanyekan mengingat laju degradasi ekosistem ini terus berlangsung di berbagai wilayah Indonesia.



Gambar 3. Sebaran status dan ancaman terhadap padang lamun di Indonesia (Unsworth et al. 2018)

Unsworth et al. (2018) melaporkan status dan ancaman terhadap ekosistem padang lamundi sepanjang wilayah Indonesia. Dalam skala yang lebih rinci Tarya et al. (2018) menetapkan status ekosistem padang lamun di Kepulauan Derawan berdasarkan ancaman plume sungai.





Gambar 4. Sebaran spasial klasifikasi resiko ekosistem di Berau Continental Shelf (BCF) Tarya *et al.* (2018)

## 2.6 Makroinvertebrata dan Komunitas Biota Asosiatif Padang Lamun

Ekosistem padang lamun memiliki daya tampung dan daya dukung bagi kehidupan beragam organisme perairan. Mulai dari organisme bentik yang kecil, kerang-kerangan, ikan-ikan ekonomis penting, hingga biota dilindungi seperti penyu dan dugong memanfaatkan layanan ekologis yang diberikan oleh padang lamun. Penyu merupakan salah satu organisme yang kebutuhan makanannya ditopang oleh padang lamun di Derawan dan sekitarnya. Roem (2013a) melaporkan bahwa ekosistem padang lamun mengalami *overgrazing* selama musim puncak peneluran penyu hijau (*Chelonia mydas*) di Pulau Derawan.

Makroinvertebrata merupakan kelompok organisme terbesar yang berasosiasi dengan padang lamun. Kelompok taksa yang paling sering ditemukan hidup berasosiasi dengan ekosistem lamun adalah kelompok gastropoda, bivalvia, dan echinodermata. Berdasarkan habitat hidupnya, fauna makroinvertebrata padang lamun terbagi menjadi 3 kelompok yaitu (1) organisme yang hidup menempel di daun dan tegakan lamun (epifauna), (2) organisme yang hidup di permukaan sedimen, dan (3) organisme yang hidup mengubur diri di dalam sedimen (infauna/interstisial). Sementara itu berdasarkan mobilitasnya, makroinvertebrata padang lamun terbagi atas dua yakni kelompok yang dapat



berpindah tempat (*benthic mobile*) dan yang menetap (*benthic sessile*).

Beberapa penelitian makroinvertebrata padang lamun menyebutkan batasan minimal ukuran yang berbeda antara lain 0.5 mm (Barba et al. 2010; Mancinelli, Pinna, and Basset 2008; Zieman and Zieman 1989), 0.7 mm (Gartner et al. 2010, 2013) dan 1 mm (Mabidi, Bird, and Perissinotto 2017).

Sumberdaya kerang-kerangan telah lama dimanfaatkan sebagai sumber protein masyarakat pesisir dan pulau-pulau kecil. Berbagai jenis kerang dari kelas bivalvia dan gastropoda banyak ditemukan di padang lamun. Keberadaan bivalvia dan gastropoda yang berasosiasi dengan padang lamun di Indonesia antara lain dilaporkan dari Sulawesi Utara (Arbi 2012; Nono, Boneka, and Gerung 2014; Susetiono 2004), Kepulauan Seribu (Rizqydiani, Ismet, and Bengen 2018), Kepulauan Derawan (Cappenberg 2006, 2007; Dijkstra and Moolenbeek 2008) Kepulauan Spermonde (Hamsiah et al. 2016; Hasniar, Litaay, and Priosambodo 2013; Litaay 2018; Litaay et al. 2007; Priosambodo 2014, 2016), dan Kepulauan Maluku (Kusnadi, Triandiza, and Hernawan 2008).

Beberapa penelitian lain menginvestigasi keanekaragaman biota padang lamun misalnya Ikan (Kneer, Asmus, Ahnelt, et al. 2008; Latuconsina and Ambo-rappe 2013; Latuconsina, Nessa, and Ambo-Rappe 2012; Latuconsina et al. 2012; Marasabessy 2010; Unsworth 2007; Unsworth et al. 2008, 2009) kelompok krustase (Unsworth 2007; Unsworth, de Grave, and Goulding 2010; Vonk, Kneer, et al. 2008) komunitas ekinodermata (Siddiq, Atmowidi, and Qayim 2016) (Laning, Yusup, and Wiryanto 2015; Supono and Arbi 2010) (Yusron 2013) dan polychaeta (Al Hakim dan Wahyuni, 2009; Ekaningrum et al., 2012).

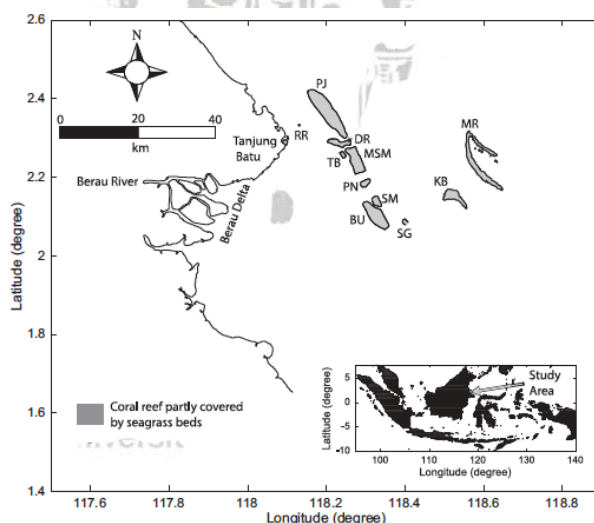
Kelompok organisme yang juga berasosiasi dengan padang lamun adalah ikan. Komposisi jenis ikan padang lamun dari berbagai daerah diantaranya di Kepulauan Riau (Fahmi and Adrim 2009), Kepulauan Derawan (Marasabessy 2010), Kepulauan Spermonde (Kneer, Asmus, Ahnelt, et al. 2008;



Kneer, Asmus, and Arie 2008; Rani, Budimawan, and Ambo-Rappe 2009; Vonk, Christianen, and Stapel 2008) (Hung Liu et al. 2008), Teluk Ambon (Latuconsina and Ambo-rape 2013; Latuconsina et al. 2012), Sulawesi Utara (Assa, Wagey, and Boneka 2015). Beberapa literatur bahkan sudah sampai mendeskripsikan secara spesifik interaksi ikan terhadap padang lamun yang menjadi habitatnya seperti dalam hasil penelitian Kneer et al. (2008) (2008) dan Liu et al. (2008).

## 2.7 Pengelolaan Kawasan Konservasi Kepulauan Derawan

Kepulauan Derawan di timur laut Kalimantan merupakan bagian dari ekoregion laut Sulu-Sulawesi. Kawasan ini memiliki ekosistem laut tropis yang lengkap dengan keanekaragaman jenis biota laut yang tinggi di Indonesia. Kepulauan Derawan termasuk dalam wilayah administrasi Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur yang berbatasan dengan Provinsi Kalimantan Utara. Kepulauan ini terdiri dari 31 pulau yang mayoritas tidak berpenghuni. Adapun pulau yang berpenghuni adalah Pulau Derawan, Pulau Sangalaki, Pulau Balikpapan dan yang terbesar Pulau Maratua.



Gambar 5. Kepulauan Derawan dimana area abu-abu merupakan pulau dan reef flat terumbu yang sebagian tertutup oleh hamparan padang lamun (PJ Pulau Panjang, RR Pulau Rabu-Rabu, DR Pulau Derawan, TB Karang Taba Binga, MSM Karang Masimbung, PN Karang Pinaka, SM Pulau Semama, BU Karang Buli Ulin, SG Pulau Sangalaki, KB Pulau Kakaban, MR Pulau Maratua (Tarya 2018; Tarya et al. 2018)



Biota yang menjadi ikon konservasi kepulauan ini adalah penyu hijau.

Penyu hijau memilih beberapa pulau diantaranya Derawan, Sangalaki, Semama, Sambit, Bilang-bilangan, Mataha dan Balikpapan sebagai habitat bertelur. Pada awalnya pengelolaan di kawasan ini bertujuan untuk perlindungan populasi penyu melalui pengendalian perdagangan telur. Pada masa pemerintahan Presiden Soeharto, Pulau Sangalaki dan Pulau Semama ditetapkan sebagai areal konservasi. Secara kronologis perjalanan pengelolaan Kepulauan Derawan adalah sebagai berikut;

1. Keputusan Menteri Pertanian nomor 604/Kpts/Um/8/1982 tentang Penunjukan Areal Hutan Pulau Semama beserta Perairannya Seluas 220 Ha yang terletak di Daerah Tingkat II Berau, Daerah Tingkat I Kalimantan Timur Sebagai Suaka Marga Satwa dan Penunjukan Areal Hutan Pulau Sangalaki beserta Perairannya Seluas 280 Ha yang terletak di Daerah Tingkat II Berau, Daerah Tingkat I Kalimantan Timur Sebagai Taman Laut.
2. SK Bupati No. 69 tahun 1999 tentang Pengelolaan Penyu dan Telurnya dalam Kabupaten Berau
3. SK Bupati No. 35 tahun 2001 tentang Pembentukan Tim Monitoring dan Penelitian Penyu di Kawasan Kepulauan Derawan
4. SK Bupati No. 44 tahun 2001 tentang Penunjukkan Pihak III Dalam Upaya Pelestarian Penyu Di Kabupaten Berau
5. Instruksi Bupati No. 660/2346-UM/XII/tahun 2001 tentang Pengelolaan Penyu dan Telurnya di Pulau Sangalaki dan Derawan untuk tidak dimanfaatkan secara langsung
6. SK Bupati No. 02 tahun 2002 tentang Penunjukkan CV. Derawan Penyu Lestari Sebagai Pengelola P. Telur Penyu Dalam Upaya



Pelestarian Penyu Di Kabupaten Berau Selain Pulau Sangalaki dan Derawan

7. SK Bupati No. 179 tahun 2003 tentang Tim Pengawasan dan Pengamanan Penyu Di Kabupaten Berau

8. SK Bupati No. 70 tahun 2004 tentang Penetapan Pulau Kakaban Sebagai Kawasan Konservasi Laut Daerah (KKLD)

9. SK Bupati No. 225 tahun 2004 tentang Tim Pengarah Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Laut Kabupaten Berau

10. Peraturan Bupati No. 31 tahun 2005 tentang Kawasan Konservasi Laut Berau

11. Keputusan Bupati Berau No. 516 Tahun 2013 tentang Pencadangan Kawasan Konservasi Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil Sebagai Taman Pesisir Kepulauan Derawan Kabupaten Berau

12. SK Bupati Berau No. 202 tahun 2014 tentang Pencadangan Kawasan Konservasi Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil sebagai Taman Pesisir Kepulauan Derawan Kabupaten Berau seluas 285.266 Ha

13. Peraturan Daerah Kabupaten Berau No. 8 Tahun 2014 tentang Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil Kabupaten Berau

14. Keputusan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia nomor 87/KEPMEN-KP/2016 tentang Kawasan Konservasi Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil Kepulauan Derawan dan Perairan Sekitarnya Di Kabupaten Berau Provinsi Kalimantan Timur

Secara spasial terdapat peningkatan luasan kawasan konservasi dari 500 Ha pada 1982 menjadi 285.548,95 Ha pada 2016. Selain itu terdapat penambahan bentuk kawasan konservasi dari semula 2 jenis yakni Suaka



Margasatwa (SM) dan Taman Wisata Alam Laut (TWAL) menjadi 4 jenis dengan

Taman Pesisir dan Taman Pulau yang masing-masing memiliki zonasi.

Sementara dalam aspek kelembagaan dan pengelolaan, TWAL Sangalaki dan

SM Semama berada di bawah pengelolaan BKSDA. Sedangkan kawasan

konservasi yang diinisiasi oleh pemerintah daerah dikelola terus mengalami

perkembangan semenjak ditetapkan melalui Peraturan Bupati No. 31 tahun

2005. Pada 2013-2014 dilakukan pencadangan kawasan konservasi dan

penetapan Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (RZWP3K)

Kabupaten Berau. Hingga pada 2016, Kawasan Konservasi Pesisir dan Pulau-

Pulau Kecil Kepulauan Derawan dan Perairan Sekitarnya Di Kabupaten Berau

Provinsi Kalimantan Timur disahkan melalui Keputusan Menteri Kelautan dan

Perikanan Republik Indonesia nomor 87/KEPMEN-KP/2016.

## **2.8 Meteorologi dan Klimatologi Benua Maritim Indonesia**

Kepulauan Indonesia tersebar antara 7° U dan 10° S dan membentang di

tiga zona waktu berbeda menjadikan Indonesia memiliki karakter klimatologi

yang khas (Tjasyono 2012). Tjasyono (2012) menjelaskan bahwa faktor

geografis dan oseanografis membentuk karakter klimatologis Indonesia yakni

terletak antara Benua Asia dan Australia serta dua Samudera yakni Pasifik dan

Hindia dihubungkan oleh Arus Lintas Indonesia. Wilayah Indonesia dilalui oleh

ekuator geografis (khatulistiwa) sekaligus ekuator klimatologis (atau zona

konvergensi intertropis). Ekinoks atau posisi matahari yang tepat pada ekuator

terjadi dua kali dalam setahun yakni pada tanggal 21 Maret dan 23 September

yang disebut hari kulminasi.

Dinamika posisi matahari tersebut membangkitkan pola sirkulasi

atmosfer. Kawasan Indonesia bukan sumber monsun tetapi terletak dalam

daerah pengaruh monsun, yakni monsun Asia Selatan, monsun Asia Tenggara,

dan monsun Australia. Ketiganya saling berinteraksi membentuk sistem

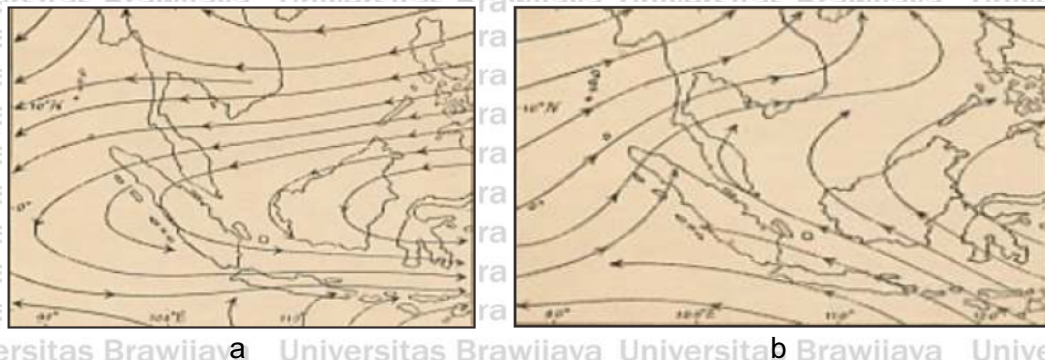


monsunal Indonesia (Wirjohamidjojo and Sugarin 2008; Wirjohamidjojo and Swarinoto 2010). Aldrian (2008) menerangkan dominasi sifat monsunal pada pola iklim Indonesia disebabkan pergerakan titik kulminasi matahari dari bumi belahan utara ke selatan dan sebaliknya dalam skala setengah tahunan. Fenomena ini menyebabkan nilai kontras akumulasi hujan pada puncak musim hujan dan puncak kemarau. Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG) menetapkan kriteria jika curah hujan diatas 150 mm per bulan, maka dikategorikan bulan basah, sebaliknya curah hujan dibawah 150 mm per bulan akan disebut bulan kering.

Diatas kepulauan Indonesia, sistem monsun bertemu dan berinteraksi dengan angin pasat (Fuad, Sambah, and Setyohadi 2012). Pasat adalah sistem angin yang ditimbulkan oleh pasangan sel tekanan tinggi subtropis belahan bumi utara dan selatan (Wirjohamidjojo and Sugarin 2008). Angin pasat bertiup sepanjang tahun, bersifat mantap (stabil) dengan lapisan sungsgangan (*inversion*) pada ketinggian sekitar 1.500 meter dan letaknya cenderung miring ke atas ke arah letak PPAT. Wirjohamidjojo dan Sugarin (2008) menjelaskan di kawasan Indonesia angin pasat tidak semuanya tampak melainkan hanya pasat tenggara dimana terbatas waktu dan daerahnya.

Wirjohamidjojo dan Sugarin (2008) menyatakan kawasan Indonesia terbagi menjadi empat wilayah dengan sistem aliran yang berbeda. Wilayah I meliputi Sumatera bagian tengah sampai bagian utara; wilayah II meliputi sekitar Kalimantan sampai Maluku bagian utara; wilayah III meliputi Sumatera bagian selatan, sekitar Jawa sampai Nusa Tenggara; wilayah IV meliputi Maluku bagian selatan dan tengah sampai Papua.

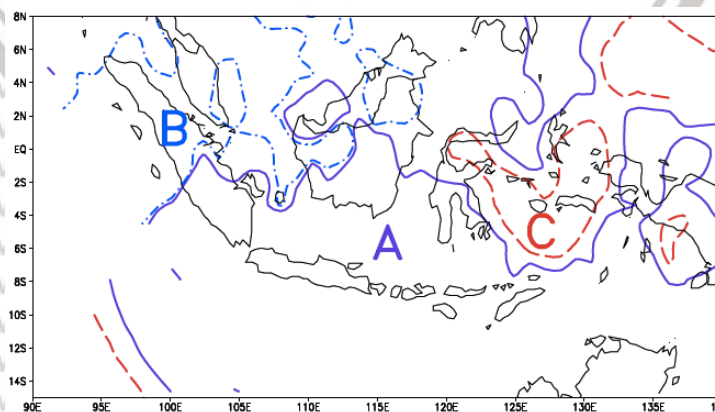




Gambar 6. Bagan arah angin di bulan (a) Januari/Monsun Timur Laut, (b) Juli/Monsun Tenggara (Wirjohamidjojo and Sugarin 2008).

Benua Australia pada musim panas menjadi daerah bertekanan udara rendah bersamaan waktu dengan Benua Asia musim dingin (monsun dingin). Adanya tekanan rendah di Benua Australia menimbulkan sebagian aliran monsun dingin Asia memasuki wilayah Indonesia. Sebaliknya, ketika tekanan tinggi di Australia yang bertepatan dengan berlangsungnya monsun panas Asia memperkuat angin pasat tenggara memasuki wilayah Indonesia sehingga membentuk sifat monsun.

Meskipun dipengaruhi sifat monsun, pola iklim tahunan di Indonesia tidak seragam untuk seluruh wilayah. Luasnya wilayah kepulauan Indonesia membentuk variasi pola iklim yang beragam (Aldrian, 2008; Wirjohamidjojo dan Sugarin, 2008).



Gambar 7. Pembagian region tipe iklim utama dimana wilayah Timur Laut Kalimantan) tidak termasuk dalam salah satu tipe iklim dan tidak mengenal musim hujan dan kemarau (Aldrian 2001, 2008)



Region A terletak di wilayah selatan Indonesia (Sumatera selatan ke pulau Timor, selatan Kalimantan, Sulawesi, dan sebagian Papua) yang disebut region monsun Australia. Region B di wilayah barat laut Indonesia (Sumatera bagian utara hingga ke Kalimantan barat laut) disebut sebagai region monsun passat tenggara. Region C (Maluku dan Sulawesi utara ) merupakan region arus lintas laut Indonesia (arindo). Wilayah A, yang meliputi wilayah terbesar, adalah pola dominan di Indonesia.

Secara umum daerah selatan Indonesia atau dibawah garis khatulistiwa, mengalami satu puncak musim hujan dan satu puncak musin kemarau. Sedangkan daerah sebelah utara dapat memiliki dua puncak hujan dan dua puncak bawah. Kedua puncak atas terjadi pada saat titik kulminasi matahari melewati daerah tersebut, sebaliknya kedua puncak bawah terjadi pada saat titik kulminasi meninggalkan daerah tersebut (Aldrian 2008). Menariknya, daerah tengah dan utara Indonesia seperti di wilayah utara dan timur laut Kalimantan tidak jelas perbedaan puncak musim kemarau dan hujan pada pola tahunannya sehingga terkadang disebut daerah iklim ekuatorial (Aldrian 2008).

## **2.9 Dinamika Monsunal Laut dan Sumberdaya Perikanan di Indonesia**

Dinamika unsur-unsur meteorologis di atmosfer memberikan pengaruh terhadap dinamika oseanografi dan sumberdaya perikanan. Beberapa penelitian di Indonesia telah mengungkap hal tersebut. Sartimbul *et al.* (2010) menyatakan variabilitas klorofil-a di Selat Bali mengikuti pola monsun. Zakiyah *et al.* (2015) menambahkan bahwa status trofik perairan Selat Bali terindikasi berhubungan dengan Arlindo, ENSO, serta monsun. Semedi dan Safitri (2015) menemukan hubungan pola sebaran klorofil-a di Selat Madura dengan pergiliran monsun. Hasil pengamatan pada dua monsun oleh Khasanah *et al.* (2013) menunjukkan bahwa kelimpahan, keanekaragaman plankton, fosfat, nitrat, bahan organik, silikat dan klorofil-a pada periode transisi II lebih tinggi dibanding musim barat.



Demikian halnya dengan suhu permukaan laut dimana Sartimbul *et al.* (2018) menyatakan suhu perairan Segara Anakan Pulau Sempu pada saat Monsun Barat Laut lebih tinggi dibandingkan saat Monsun Tenggara.

Pengaruh pergiliran monsun mempengaruhi sumberdaya perairan khususnya kelompok pelagis. Jalil *et al.* (2020) menemukan bahwa konsentrasi klorofil-a sepanjang Monsun Barat Daya di perairan Kota Makassar relatif subur, peta prediksi zona potensial penangkapan ikan pelagis kecil cenderung berpindah-pindah dan tidak permanen. Temuan Jalil *et al.* (2020) ini sebenarnya mengkonfirmasi temuan Semedi dan Dimiyati (2009) sebelumnya yang menyatakan bahwa SST (*Sea Surface Temperature*/Suhu Permukaan Laut) dan distribusi klorofil memiliki hubungan erat terhadap distribusi lokasi penangkapan Ikan Makarel (*Rastrelliger spp.*). Mengantisipasi variasi temporal Fearn *et al.* (2007); Semedi dan Dimiyati (2009) menyarankan agar dilakukan pengamatan yang mewakili setiap musim/tahun secara berkelanjutan.

Sartimbul *et al.*, (2018) menemukan bahwa keberadaan ikan pelagis kecil di Selat Bali berkaitan dengan Monsun. *Sardinella lemuru* merupakan jenis dominan saat Monsun Tenggara. Sementara *Decapterus spp.* dan *Euthynnus affinis* mendominasi pada saat Monsoon Barat Laut. Sartimbul *et al.*, (2018) menambahkan produksi *S. lemuru* bervariasi mengikuti musim dimana jumlah tangkapan minimum terjadi saat transisi (Maret - Mei) dan tangkapan maksimum tercatat pada transisi 2 (September - Nopember).

Yona *et al.* (2017) menemukan hubungan monsoon pada distribusi dan tingkah laku makan dari *S. lemuru* yang berimplikasi pada kandungan omega-3.

Di periode transisi kandungan fitoplankton saluran cerna tinggi dan Omega-3 *S. lemuru* tinggi dibanding musim lain.

Vonk *et al.* (2010) meneliti kelimpahan invertebrata makrobentik dari padang lamun Pulau Bone Batang di Kepulauan Spermonde Di sebelah barat



daya Sulawesi pada musim yang berbeda. Hasil kajian menunjukkan pengaruh musim signifikan terhadap kelimpahan moluska. Hamsiah *et al.* (2016) membandingkan kelimpahan bivalvia di pesisir Pangkep yang juga berhadapan dengan Kepulauan Spermonde. Hamsiah *et al.* (2016) menemukan bahwa keanekaragaman dan kelimpahan lebih tinggi pada musim kemarau. Temuan Hamsiah *et al.* (2016) mengkonfirmasi temuan Vonk *et al.* (2010).

Sejauh ini kajian dinamika monsun banyak dilakukan di Kepulauan Spermonde, Laut Jawa, Selatan Jawa dan Selat Bali yang termasuk region klimatologi A (Region Monsun Australia) yang merupakan region terluas dan dominan di Benua Maritim Indonesia. Secara umum Region A dimana perbedaan antara musim hujan kemarau sangat nyata menunjukkan respon dinamika ekologis dan sumberdaya yang serupa yakni tingginya perbedaan antar musim.

Distribusi daratan dan lautan Kepulauan Indonesia yang terletak antara dua benua dan menghubungkan dua samudera melalui ITF bertemu dengan fenomena klimatologi-meteorologi (ENSO, IOD, ITCZ, MJO, Borneo Vortex, dll) membentuk berbagai varian lokal dinamika oseanografi yang unik dan kompleks.

Ningsih *et al.* (2018) menyatakan dinamika oseanografi di perairan Indonesia seperti arus, *front*, *eddy* (terkait *shear velocity* dan penjarangan gelombang Rossby), kedalaman termoklin, serta *upwelling* berdampak pada kesuburan perairan dan pola migrasi, daerah pemijahan, dan kelimpahan ikan pelagis. Ningsih *et al.* (2018) melanjutkan, variabilitas iklim dalam skala waktu intramusiman, musiman, antartahunan, hingga *intradecadal*, *decadal*, dan *interdecadal* berperan terhadap dinamika oseanografi, kesuburan suatu perairan, dan kelimpahan ikan pelagis baik secara spasial maupun temporal.

Berdasarkan uraian diatas, kajian-kajian terhadap variabilitas spasio-temporal ekosistem dan sumberdaya perairan Indonesia kaitannya dengan dinamika klimatologi, meteorologi, dan oseanografi perlu digalakkan untuk



melengkapi mozaik khazanah pengetahuan. Penelitian tersebut dapat dimulai dari skala yang spasial dan temporal yang sempit juga dari skala ekosistem atau komunitas secara spesifik atau lokal. Keterbatasan-keterbatasan setiap kajian kedepannya dapat dioptimalkan dampaknya dengan mengintegrasikan hasil kajian tersebut sehingga menghasilkan pengetahuan yang komprehensif dan holistik terkait dinamika ekosistem dan sumberdaya perairan dari Negara Kesatuan Republik Indonesia.

## 2.10 Publikasi yang Berkaitan Dengan Rencana Penelitian

Beberapa publikasi hasil penelitian yang secara kontekstual memiliki keterkaitan dengan aspek-aspek dari rencana penelitian ini dirangkumkan pada tabel 2, 3 dan 4.

Tabel 2. Penelitian yang telah dilakukan terkait aspek klimatologi dan meteorologi

No.	Rujukan	Lokasi	Data	Metode
1.	Aldrian, 2001	Indonesia (526 stasiun)	Monthly rainfall mean (1961-1993)	Double correlation
2.	Hamada <i>et al.</i> 2002	Indonesia (46 stasiun)	Pentad mean rainfall data (1961-1990)	Harmonic analysis
3.	Aldrian & Susanto, 2003	Indonesia (100 stasiun)	Monthly rainfall mean (1961-1993)	Double correlation & Empirical Orthogonal Function (EOF)
4.	Chang <i>et al.</i> 2005	Asia Tenggara (935 stasiun)	Monthly rainfall mean (1950-2002)	Re-analysis TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)
5.	Dambul & Jones, 2007	Pulau Kalimantan (20 stasiun 3 negara)	Daily & Monthly rainfall (1960 – 2001)	Cluster Analysis
6.	Koseki <i>et al.</i> , 2014	Pulau Kalimantan	JRA25 (1981-2004); JCDAS (2005-2008); TRMM (1998-2008)	Non-Hydrostatic Model (NHM) Weather Prediction
7.	Supari <i>et al.</i> , 2016	Pulau Kalimantan (Indonesia; 15 Stasiun)	Daily rainfall data (40 Tahun)	Model Statistik Meteorologi

Aldrian (2001) membagi Benua Maritim Indonesia (BMI) kedalam tiga region iklim berdasarkan pola curah hujan tahunan. Region A (Monsun Australia)



terletak di wilayah selatan. Region B (monsun passat tenggara) di wilayah barat laut Indonesia. Region C (arus lintas laut Indonesia). Hamada *et al.* (2002) melakukan kajian variasi regional dan interannual musim hujan dan menghasilkan lima klasifikasi klimatologis Indonesia;

1. A-I: Siklus tahunan dominan dan curah hujan maksimum terjadi selama September – Februari;
2. A-II: Siklus semi-tahunan dominan dan curah hujan maksimum terjadi selama September – Februari;
3. B-I: Siklus tahunan dominan dan curah hujan maksimum terjadi selama Juli–Agustus atau Maret – Juni;
4. B-II: Siklus semi-tahunan dominan dan curah hujan maksimum terjadi selama Juli–Agustus atau Maret – Juni; dan
5. C: Musim hujan dan kemarau tidak jelas.

Hamada *et al.* (2002) secara spesifik menyebutkan bahwa wilayah utara dan timur laut Kalimantan tergolong dalam Tipe C dimana tidak ada musim hujan yang jelas dikarenakan hujan turun sepanjang tahun.

Aldrian & Susanto (2003) mengupdate regionalisasi iklim sebelumnya oleh Aldrian (2001), dimana selain 3 iklim region utama, terdapat daerah intermediate dimana Musim hujan dan kemarau tidak jelas. Hasil yang diperoleh selaras dengan Hamada *et al.* (2002). Pada daerah tengah dan utara Indonesia (timur laut Kalimantan) membentuk tipe sendiri, dicirikan ketidakjelasan musim hujan dan kering dimana hujan merata sepanjang tahun. Hal yang sama kembali ditegaskan oleh Chang *et al.* (2004).

Variabilitas kondisi klimatologi Borneo/Pulau Kalimantan dikaji lebih lanjut oleh Dambul dan Jones (2007) yang membagi Pulau Kalimantan (Indonesia, Malaysia dan Brunei Darussalam) menjadi 3 kelompok. Wilayah Timur Laut Kalimantan tergolong dalam grup C dimana musim hujan dimulai selama Monsun



Timur Laut dan puncak curah hujan terjadi lebih dari sekali pada kedua monsun (timur laut dan tenggara). Koseki *et al.* (2014) mengungkapkan bahwa meratanya distribusi curah hujan di Kalimantan berkorelasi dengan fenomena sirkulasi atmosfer Borneo Vortex yang membawa awan konvektif hujan. Hasil penyelidikan Supari *et al.* (2016) terhadap curah hujan ekstrim menunjukkan bahwa wilayah timur laut Kalimantan tergolong stabil.

Tabel 3. Penelitian yang telah dilakukan terkait aspek hidrooseanografi

No.	Rujukan	Lokasi	Data	Metode
1.	Tarya <i>et al.</i> 2010	Kepulauan Derawan	ADCP (Acoustic Doppler Profiler)	ECOMSED (Estuarine and Coastal Ocean Model SEDiment).
2.	Atmadipoera dan Mubaraq, 2016	Laut Sulawesi	INDESO (Infrastructure Development for Space Oceanography)	Komparasi dan Validasi INDESO terhadap AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)
3.	Tarya <i>et al.</i> 2015	Kepulauan Derawan	ADCP (Acoustic Doppler Profiler)	ECOMSED (Estuarine and Coastal Ocean Model SEDiment).

Atmadipoera dan Mubaraq (2016) telah menjelaskan pola sirkulasi, struktur vertikal arus, dan variabilitas Arus Lintas Indonesia (Arlindo) Laut Sulawesi pada tiga level kedalaman berbeda 15 m (lapisan tercampur), 130 m (termoklin) dan 318 m (sub-termoklin). Pola Arlindo di sekitar wilayah pantai timur laut Kalimantan yang bergerak dari timur ke barat (Laut Sulawesi menuju daratan Kalimantan) kemudian ketika mendekati daratan bergerak ke selatan mengikuti kontur batimetri sepanjang lerengan (*slope*) bagian timur laut Kalimantan. Lebih lanjut pola sirkulasi massa air di Kepulauan Derawan yang terletak di dangkalan timur laut Kalimantan dijelaskan oleh Tarya *et al.* (2010). Tarya *et al.* (2010) menerangkan bahwa karakteristik primer pergerakan pasang surut di Kepulauan Derawan adalah pola *cross-isobath tidal propagation* yang bersinggungan sepanjang dangkalan laut. Pada perairan dengan kedalaman lebih dari 5 m, dinamika hampir 1 dimensi, mendekati pesisir pasang surut bervariasi akibat



gesekan dasar. Tipe pasut campuran dan cenderung semidiurnal. Tidal range berkisar antara 1 m (neap tide) hingga 2.5 m (spring tide).

Berdasarkan temuan Tarya *et al.* (2010), Tarya *et al.* (2015) selanjutnya memodelkan distribusi plume Sungai Berau yang dikaitkan dengan variasi angin.

Hasilnya menunjukkan bahwa dinamika plume dikontrol oleh kekuatan angin.

Tarya *et al.* (2015) mendeskripsikan pola monsun angin di perairan Kepulauan

Derawan sebagai berikut, Monsun Barat Laut (Northwest) berlangsung dari

Desember hingga Februari dimana angin berhembus stabil dan dominan dari

arah utara dan timur laut. Monsun Tenggara (Southeast) berlangsung dari Juli

hingga September dimana angin dominan dari arah selatan dan tenggara. Kedua

monsun dipisahkan 2 periode transisi, Transisi I (Maret-Juni) dan Transisi II

(Oktober-Nopember) dimana angin melemah dengan arah bervariasi.

Tabel 4. Penelitian yang telah dilakukan terkait aspek dinamika padang lamun.

No.	Rujukan	Lokasi	Data	Metode
1.	Vonk <i>et al.</i> 2010	Kepulauan Spermonde (12 Satsiun)	Biometrik Lamun, Kualitas Air, dan indeks invertebrata makrobenthik	Ecological Multivariate Analysis (MANOVA)
2.	van Katwijk <i>et al.</i> 2011	Kepulauan Derawan (15 stasiun pulau)	Biometrik Lamun & Kualitas Air	Ecological Multivariate Analysis (Nested ANOVA)
3.	Amri <i>et al.</i> 2012	Kepulauan Spermonde	Biometrik Lamun & Kualitas Air	Numerical Ecology
4.	Marina <i>et al.</i> , 2012	Genoveses Bay, Spanyol	Indeks Ekologi Moluska	Ecological Multivariate Analysis (ANOSIM, MANOVA, and SIMPER)
5.	Jankowska <i>et al.</i> 2014	Puck Bay, Baltic Sea (2 stasiun)	Biometrik Lamun, Kualitas Air, dan indeks invertebrata makrobenthik	Numerical Ecology (PERMANOVA, NMDS)
6.	Govers <i>et al.</i> , 2015	Oosterschelde Delta, Belanda	Biometrik Lamun, Kualitas Air dan Proximat	Numerical Ecology
7.	Mckenzie <i>et al.</i> , 2016	Singapura	Biometrik Lamun, Kualitas Air, Sedimen, iklim, data	Numerical Ecology (NMDS, Cluster Analysis, ANOVA, Multiple Regression)



8.	Hamsiah <i>et al.</i> 2016	Kepulauan Spermonde	Biometrik Kualitas Air, dan indeks invertebrata makrobenthik	Lamun, dan	Numerical (MDS, SIMPER, Regression)	Ecology ANOSIM, Multiple
9.	Tarya <i>et al.</i> 2018	Kepulauan Derawan	Biometrik Kualitas Air	Lamun &	ECOMSED (Estuarine and Coastal Ocean Model SEDiment) & Numerical Ecology	

Penelitian dinamika spasio-temporal padang lamun lebih dahulu berkembang pada daerah bermusim empat. Marina *et al.* (2012) menggunakan indeks-indeks ekologi lamun dan fauna bentik sebagai proxi penilaian kondisi ekosistem padang lamun. Jankowska *et al.* (2014) menyatakan stabilitas padang lamun terhadap dinamika musiman memiliki kaitan dengan keberadaan fauna bentik. Govers *et al.* (2014) menambahkan bahwa kemampuan bertahan dari jenis-jenis lamun di daerah bermusim empat didukung oleh mekanisme metabolisme dan kemampuan menyimpan energi pada rhizoma.

Di daerah tropis secara umum khususnya di Indonesia kajian spasial dan temporal padang lamun mulai berkembang. Secara spasial, Amri *et al.* (2012) menemukan bahwa di Kepulauan Spermonde secara spasial terdapat perbedaan signifikan pada komposisi dan kondisi padang lamun antara perairan yang alami dan terpegaruh oleh aktifitas antropogenik. Hal yang sama dilakukan oleh van Katwijk *et al.* (2011) di Kepulauan Derawan. Hasilnya pembagian zonasi *Berau Continental Shelf* (BCS) menjadi 3 region berdasarkan salinitas dan pengaruh sungai. Hasil kajian menunjukkan bahwa Pulau Panjang masuk dalam zona intermediate yang mendapatkan pengaruh baik dari laut lepas maupun dari daratan. Penelitian menunjukkan bahwa kondisi ekosistem padang lamun di Pulau Panjang masih tergolong alami. Dinamika spasial kondisi lamun alamiah juga dikaji oleh Mckenzie *et al.* (2016) untuk padang lamun tropis di Singapura.



Secara spasio temporal Vonk *et al.* (2010) mengkaji pada kelimpahan musiman dari invertebrata makrobentik dari padang lamun di Pulau Bone Batang Kepulauan Spermonde. Hasil kajian menunjukkan bahwa pengaruh musim hanya signifikan terhadap moluska. Temuan Vonk *et al.* (2010) ini dikonfirmasi oleh Hamsiah *et al.* (2016). Kesamaan pola yang ditemukan dikarenakan Vonk *et al.* (2010) maupun Hamsiah *et al.* (2016). melakukan kajian pada region iklim yang sama yakni region A yang jelas batasan antara musim hujan dan kemarau.

Kajian Mckenzie *et al.* (2016) menunjukkan bahwa padang lamun di Singapura menunjukkan pola tahunan unimodal (mode tunggal) terhadap dinamika pertumbuhan mencapai puncak saat akhir periode transisi menuju monsun Barat Daya. Sementara itu Tarya *et al.* (2018) telah memodelkan secara spasial status ekosistem padang lamun terhadap variabilitas salinitas.

Keterkaitan ketiga aspek sebagaimana diuraikan diatas menjadi dasar kerangka konseptual penelitian dimana kondisi klimatologis sebagai latar sumber variabilitas di geofisik atmosfer yang berinteraksi dengan komponen geofisik perairan. Bentuk konkret dinamika hidrooseanografi yang belum dikaji dalam penelitian sebelumnya adalah dinamika spasial dan temporal gelombang yang memicu sirkulasi vertikal di laut dangkal khususnya ekosistem padang lamun.

Gelombang merupakan salah satu variabel utama penilaian kerentanan pada wilayah/ekosistem pesisir (Semedi, Husain, and Hidayati 2016) Terlebih pada zona intertidal dan subtidal dangkal yang menjadi habitat lamun dan makroinvertebrata asosiatifnya, gelombang memberikan pengaruh fisik yang signifikan (Kurniawan 2018). Hal tersebut selanjutnya berimplikasi pada laju dan arah reaksi kimia unsur hara lingkungan dan respon biologis organisme.

Sinyalemen dinamika spasial dan temporal respon habitat laut dangkal terhadap pola sirkulasi atmosfer dan oseanografi Benua Maritim Indonesia telah diimplikasikan oleh Semedi dan Rahmawan (2016). Semedi dan Rahmawan



(2016) menemukan bahwa secara temporal rerata SST/suhu permukaan laut Indonesia pada periode 2007-2012 menunjukkan trend peningkatan, sementara secara spasial dan temporal tingkat stress pemutihan karang perairan Tegal cenderung lebih tinggi dibanding perairan lain di Indonesia.





**BAB III****KERANGKA KONSEP PENELITIAN****3.1 Kerangka Konseptual**

Pengaruh dinamika iklim terhadap ekosistem laut dangkal dan pantai belum banyak mendapatkan perhatian dari peneliti di Indonesia. Berbeda dengan vegetasi teresterial yang telah banyak diketahui dinamika musimannya, terutama vegetasi yang dibudidayakan. Dinamika musiman vegetasi padang lamun yang memiliki beragam fungsi dan peran ekologis belum banyak diungkap. Pola musonal dinamika angin di Kepulauan Derawan yang diungkap oleh Tarya *et al.* (2015) memberikan ruang bagi penelitian dinamika padang lamun antar musim. Berdasarkan pola angin tersebut Tarya *et al.* (2018) memodelkan distribusi spasio temporal *plume* Sungai Berau yang mendegradasi salinitas terhadap ekosistem lamun dan terumbu di Kepulauan Derawan. Berdasarkan model tersebut, Kepulauan Derawan terbagi kedalam 3 tingkat (resiko tinggi, sedang, dan rendah) dimana Pulau Panjang termasuk dalam kategori beresiko tinggi.

van Katwijk *et al.* (2011) menyatakan bahwa sebelum terjadi keruntuhan ekologis, maka padang lamun akan merespon perubahan pada level yang berbeda antara lain individu, ekosistem, dan lansekap. Respon individu telah dijelaskan oleh Christianen *et al.* (2011). Sementara respon pada level ekosistem dan lansekap belum dikaji khususnya yang berkaitan dengan dinamika jangka panjang dimana terjadi perubahan lingkungan.

Monsun di perairan Timur Laut Kalimantan ditandai oleh hembusan angin kuat yang membangkitkan gelombang tinggi. Gelombang yang memasuki perairan dangkal berinteraksi dengan dasar perairan, mengaduk sedimen, dan nutrien yang berimplikasi pada kualitas air. Musa, Yanuhar, dan Soemarno (2016) menyatakan bahwa air secara simultan memiliki beberapa fungsi pendukung kehidupan biota. Secara fisik, air merupakan media hidup dan



memberi ruang biota. Secara kimia air berperan sebagai media pembawa unsur hara nutrisi, vitamin, dan gas-gas terlarut. Secara biologis, menjadi media bagi aktifitas metabolisme baik pembentukan maupun perombakan zat organik. Gelombang pada kedua periode puncak monsun memberi pengaruh terhadap sifat fisik kimia perairan. Pengaruh tersebut akan direspon oleh vegetasi lamun (Kurniawan 2018). Perubahan lingkungan perairan dan ekosistem lamun selanjutnya akan berimplikasi terhadap komunitas organisme yang berasosiasi.

Pulau Panjang dipilih sebagai lokasi kajian berdasarkan pertimbangan dan asumsi antara lain:

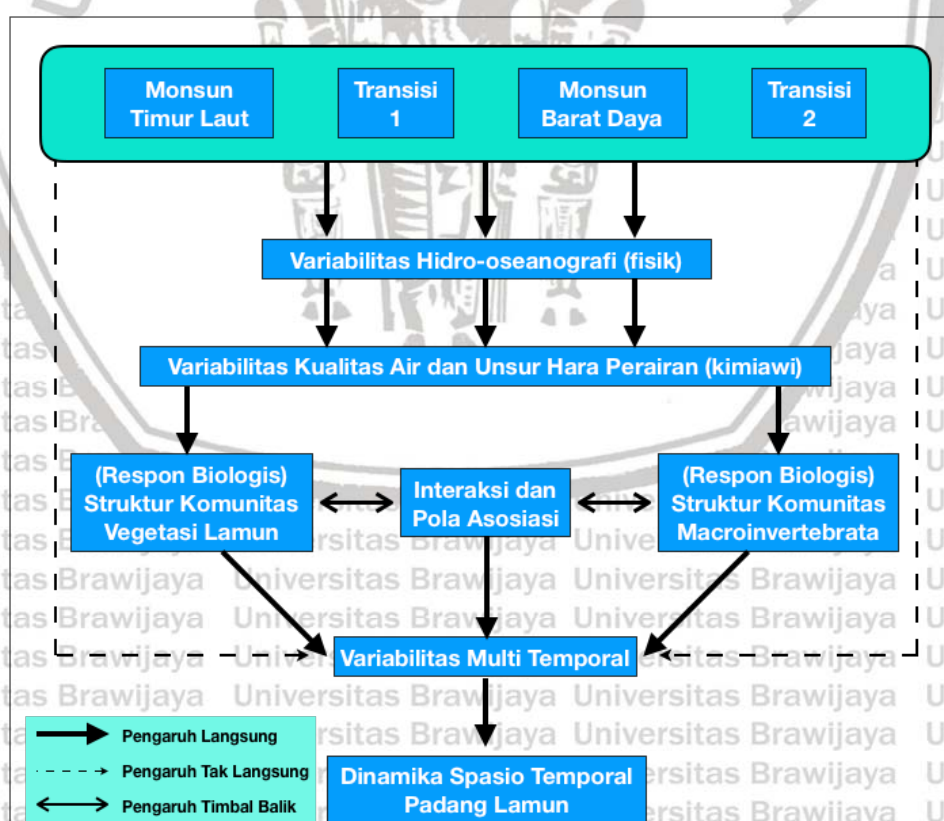
1. Secara geografi dan Klimatologis wilayah ini dekat dengan khatulistiwa ( $2^{\circ}$  LU), berada dalam pengaruh monsun dengan pola iklim ekuatorial yang tidak mengenal musim hujan dan kemarau (Aldrian, Dümenil Gates, and Widodo 2007; Aldrian and Dwi Susanto 2003; C. P. Chang et al. 2005; Hamada et al. 2002).
2. Posisi pulau panjang berada di zona intermediate *Berau Continental Shelf* (van Katwijk, M. E W van der Welle, et al. 2011) yang mendapatkan pengaruh dari daratan maupun laut lepas baik pada skala harian, pekanan, bulanan, dan musiman.
3. Pulau panjang memiliki areal padang lamun yang luas dengan komposisi jenis lamun yang beragam.
4. Pulau panjang merupakan pulau tidak berpenghuni, termasuk dalam kawasan konservasi (sebagian berstatus zona inti, sebagian sebagian zona pemanfaatan terbatas) dimana aktifitas manusia sangat minimal sehingga mencerminkan kondisi ekosistem lamun yang sangat alami.

Komponen penelitian melibatkan pemodelan karakteristik gelombang untuk mengetahui *wave climate*. Analisis sedimen untuk mengetahui dinamika sedimen



dan morfodinamika pantai jangka panjang akibat interaksi dengan proses hidrodinamika perairan. Beragam parameter kualitas perairan dan biometrik ekosistem lamun menjadi variable amatan. Komunitas asosiatif yang ditetapkan sebagai variabel adalah kelompok makroinvertebrata bentik. Kelompok makroinvertebrata bentik dipilih dengan beberapa pertimbangan antara lain relasi yang erat dengan padang lamun, mobilitas lamban bahkan sebagian bersifat bentik sessil (Kurniawan 2018). Umumnya keanekaragaman makroinvertebrata lebih tinggi pada perairan bervegetasi lamun dibandingkan hamparan pasir tak bervegetasi. Keanekaragaman makroinvertebrata Pulau Panjang belum pernah dikaji termasuk beberapa jenis ekonomis penting yang dimanfaatkan oleh masyarakat

Secara konseptual, kerangka konseptual penelitian disajikan sebagai berikut.



Gambar 8. Kerangka konseptual penelitian



Formulasi *research gap* dari penelitian ini bahwasanya generalisasi model oleh Tarya *et al.* (2018), merupakan kolaborasi data dari dua penelitian terdahulu yakni van Katwijk *et al.* (2011) dan Tarya *et al.* (2015). Dalam kajian tersebut, Pulau Panjang hanya diwakili satu stasiun sampling. Hal ini diakui dan dinyatakan secara eksplisit oleh van Katwijk *et al.* (2011). Sementara Tarya *et al.* (2018) memberikan penekanan pada pengaruh penurunan salinitas berdasarkan model. Penelitian terdahulu belum mempertimbangkan dinamika musonal, karakter oseanografi dan geomorfologi Pulau Panjang yang berpengaruh dalam membentuk dinamika ekologi komunitas padang lamun. Hasil sebuah pemodelan sangat ditentukan oleh jumlah variabel, kepadatan data, asumsi dan syarat batas yang digunakan. Oleh karena itu penelitian ini mencoba mengkaji aspek yang belum tercover dalam penelitian sebelumnya.

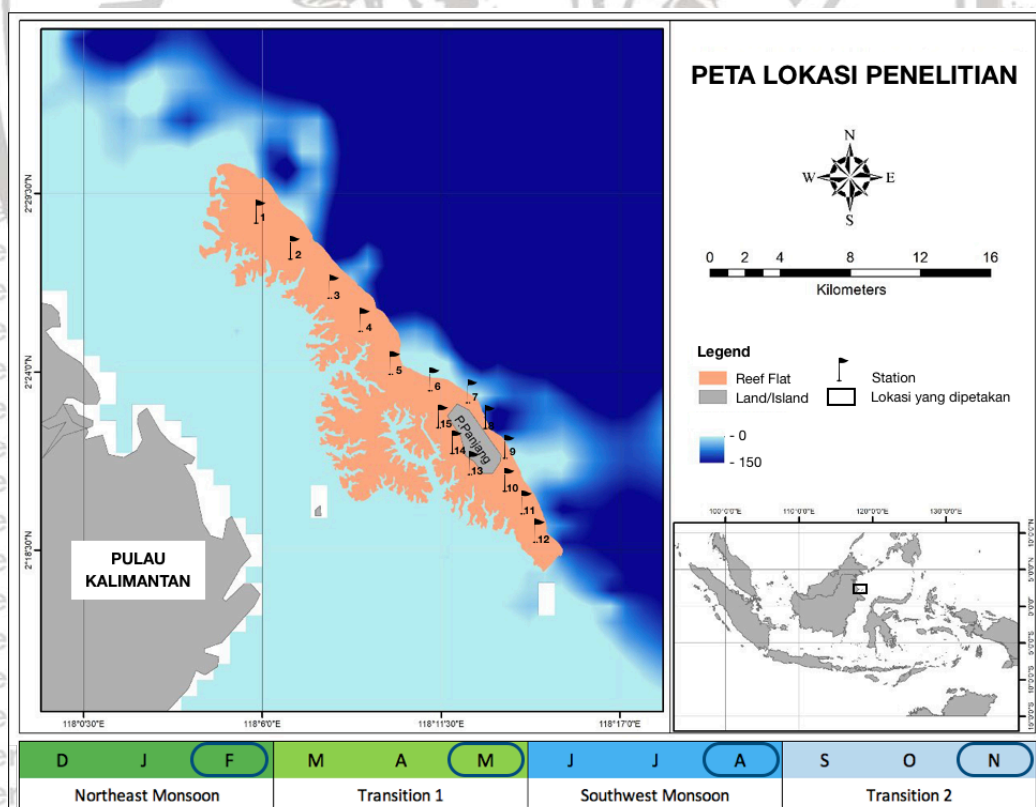


## BAB IV

### METODE PENELITIAN

#### 4.1 Tempat dan Waktu

Penelitian dilaksanakan di Pulau Panjang ( $118^{\circ}11'37.99''$  -  $118^{\circ}13'20.05''$  BT dan  $2^{\circ}20'52.97''$  -  $2^{\circ}23'03.94''$  LU) Kecamatan Pulau Derawan. Pulau Panjang terletak di Timur Laut Pulau Kalimantan kurang lebih 15 km sebelah timur Tanjung Batu di daratan utama Pulau Kalimantan. Dari Tarakan, Pulau Panjang terletak 120 Km ke arah selatan dan dapat dicapai dalam 3 jam dengan menggunakan speedboat 200 PK atau 8 jam menggunakan perahu nelayan. Pulau Panjang merupakan bagian dari Kepulauan Derawan dan termasuk dalam Kawasan Konservasi yang dikelola oleh Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur.



Gambar 9. Peta lokasi penelitian di Pulau Panjang Kepulauan Derawan. Sampling dan Observasi lapangan dilakukan pada bulan Januari-Februari (Monsun Timur Laut), April-Mei (Peralihan 1), Agustus-September (Monsun Barat Daya), dan Nopember (Peralihan 2)



Penelitian berlangsung selama lebih kurang 1 tahun dengan empat kali pengambilan data pada Monsun Timur Laut (Januari-Februari), Transisi 1 (Mei), Monsun Barat Daya (Agustus-September) dan Transisi 2 (Nopember).

Pengambilan data lapangan dilakukan setelah puncak sampai akhir setiap monsun dan peralihan dengan asumsi bahwa pengaruh monsun terhadap ekosistem terakumulasi setiap akhir periode monsun. Pengambilan data dilakukan pada 15 stasiun penelitian yang dicatat koordinat geografisnya untuk memudahkan pada saat pengambilan data periode berikutnya. 15 stasiun penelitian terdistribusi secara proporsional berdasarkan karakteristik habitat dan komposisi jenis padang lamun.

Analisis variabel fisika, kimia perairan, dan sampel biota dilaksanakan baik secara insitu di lapangan maupun di Laboratorium Kualitas Air dan Lingkungan Universitas Borneo Tarakan.

#### 4.2 Alat dan Bahan

Peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian disajikan pada tabel 5 dan 6 :

Tabel 5. Peralatan yang digunakan dalam pengumpulan, analisis, dan pemrosesan data penelitian

Tahap Kegiatan	Peralatan	Spesifikasi
Pengumpulan data ekosistem padang lamun, makroinvertebrata, dan sedimen	Peralatan SCUBA	Technisub
	Kamera bawah air	Nikon AW100, 16 MP, Built-In GPS, IPX8
	GPS Receiver	Garmin
	Transek Kuadrat	PVC 0.5 m <sup>2</sup> dan 1 m <sup>2</sup>
	Kertas tahan air	
	Papan (Slate)	
	Pelampung Sampel	Seagrasswatch
	Slate Identifikasi Lamun	Diameter 6 inci, tinggi 8 inci
	Sedimen Core	Bagus Zipper bag 25x35 cm
Pengumpulan data kualitas air in-situ	Kantong Sampel	2 mm Mesh size
	Sieve Net	HDPE Volume 80 liter
	Box Sampel	
	Water Quality Checker	AZ Instrument 8603 Multiparameter, IP67
	ORP Meter	Trans Instrument Senz Redox
Analisis laboratorium	Botol Sampel	350 ml PE Bottle
	Box Sampel	Marine Cooler Volume 35 Liter
	Glassware	IWAKI
	UV-Vis Spektrofotometer	PG Instrument T60, accuracy +/- 1nm



kualitas air	Turbidity Meter	
Analisis laboratorium lamun	Talam Plastik Kertas koran Kamera DSLR Buku identifikasi lamun	
Analisis laboratorium sedimen	Talam Plastik Oven Sieve Net Set Timbangan analitik Segitiga tekstur	Memmert Engelmann AG; mesh size 2000 - 60 $\mu$ m scale precision 1mg jt1003b 100 x 0.001g
Analisis Sampel Makroinvertebrata	Talam Plastik Lup Buku identifikasi	
Analisis data Klimatologi dan hidrooseanografi	MS-Excel for Mac WRPLOT View for Windows Google Earth Pro for Mac Surfer for Windows	Microsoft Corporation Lakes Environmental Software Google Golden Software
Analisis data lamun dan makroinvertebrata	MS-Excel for Mac PAST V3.22 For Mac IBM SPSS V25 For Mac	Microsoft Corporation University of Oslo IBM Corporation
Analisis data Sedimen	MS-Excel for Mac Gradistat v 4.0	Microsoft Corporation University of London
Analisis data model/statistik ekologi	MS-Excel for Mac PAST V3.22 For Mac IBM SPSS V25 For Mac	Microsoft Corporation University of Oslo IBM Corporation

Tabel 6. Bahan yang digunakan dalam penelitian

Nama Bahan	Kegunaan	Tipe/Spesifikasi
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Destruksi Asam	5 N
Aquadest	Solvent	
Brucine	Reagent analisis Nitrat	
NaCl	Reagent analisis nitrat	
Indikator PP	Reagent analisis fosfat	
Larutan campuran	Reagent analisis fosfat	50 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 5N, 5 ml Kalium Antimonil Tartrat, 15 ml Amonium Molibdat, 30 Asam Askorbat
NaOH	Mengatur pH	

### 4.3 Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan interdisipliner berupa integrasi konsep, metode, dan analisis untuk mempelajari dinamika ekosistem. Data yang digunakan terdiri atas data primer dan sekunder. Data primer meliputi data-data yang berkaitan dengan ekosistem padang lamun, makroinvertebrata asosiatif, dan variabel lingkungan. Data sekunder berupa data klimatologi dan meteorologi



yang bersumber dari Stasiun Meteorologi Kelas III Bandar Udara Juwata – Kota Tarakan.

Pengumpulan data primer dilakukan dengan survey ekologi terhadap komponen biotik antara lain lamun dan makroinvertebrata beserta kuantifikasi sejumlah parameter fisika dan kimia lingkungan perairan. Adapun kegiatan observasi lapangan, pengambilan sampel dan analisis data dilaksanakan dalam beberapa tahapan.

#### 4.3.1 Penentuan Stasiun Pengamatan

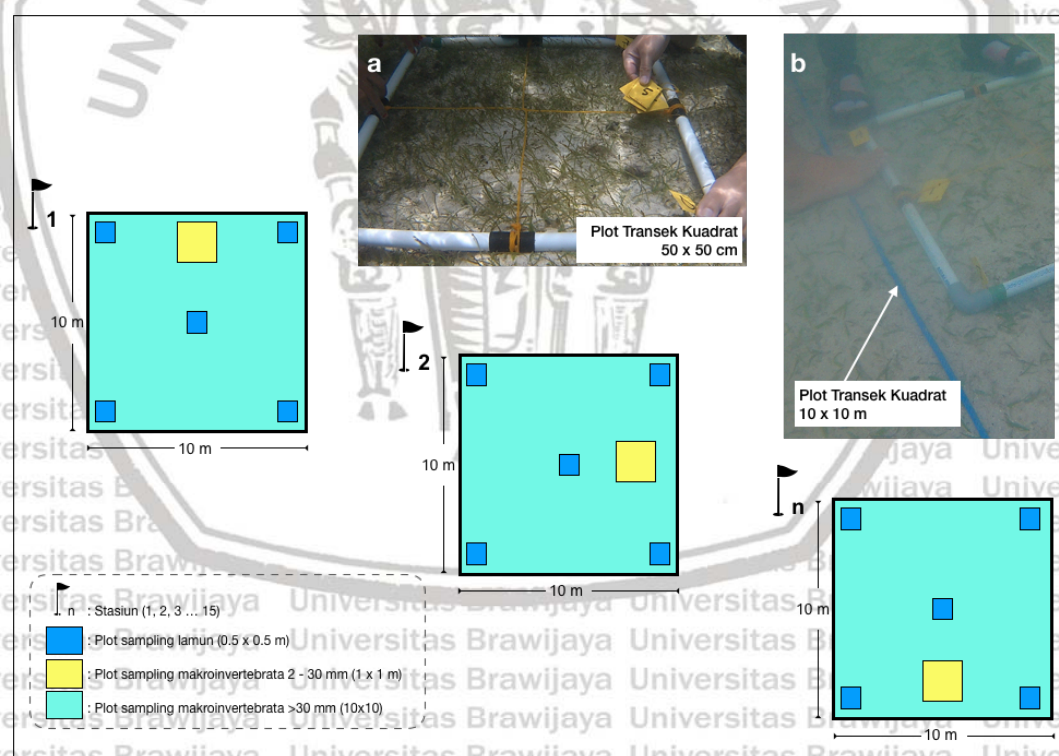
Penentuan stasiun sampling ditentukan berdasarkan pertimbangan karakteristik geomorfologi pulau Panjang, pola sirkulasi massa air, serta komposisi jenis dan tipe habitat lamun. Tipe habitat lamun di Pulau Panjang antara lain intertidal dan subtidal pada *reef flat* Pulau Panjang. Penentuan stasiun pengamatan dilakukan melalui observasi visual dengan perahu berkecepatan rendah. Pada area tertentu dilakukan snorkeling untuk pengamatan yang lebih rinci.

Sebanyak 15 titik terpilih sebagai stasiun permanen (*revisited site*) yang menjadi lokasi pengamatan untuk setiap periode sampling yang berbeda (gambar 9). Stasiun no. 1-6 pengamatan terletak di sebelah utara Pulau Panjang berupa *reef flat* yang luas dan terbuka memanjang ke arah Barat Laut. Stasiun no. 7-9 berada di sebelah timur pulau panjang, daerah ini merupakan habitat lamun yang *reef flat* sempit dan memanjang berbatasan dengan Daratan Pulau Panjang disisi barat dan Laut Sulawesi pada sisi timur. Stasiun no. 10-12 terletak di selatan Pulau Panjang memanjang ke arah tenggara mengikuti perpanjangan *reef flat*. Stasiun no. 13-15 berbatasan langsung dengan sisi barat barat Pulau panjang hingga ke tepi *reef flat*.



### 4.3.2 Sampling dan Analisis Data Lamun

Pengambilan data dilakukan pada setiap stasiun. Metode pengamatan kerapatan dan persentase tutupan lamun menggunakan transek kuadrat (Duarte and Kirkman 2001; McKenzie and Campbell. S. J. 2002; Rahmawati et al. 2014; Short et al. 2006) Transek kuadrat yang digunakan untuk pengamatan lamun berukuran  $0.5 \times 0.5 \text{ m}$  ( $0.25 \text{ m}^2$ ). Setiap stasiun terdiri atas 5 plot pengamatan transek kuadrat sebagai ulangan. Jarak antar setiap plot pengamatan transek/ulangan minimal 5 m. Setiap stasiun akan diberi patok penanda dan dicatat posisi koordinat geografisnya untuk memudahkan menemukan lokasi pada saat kunjungan/pengambilan data pada periode berikutnya. Sketsa desain rinci plot pengamatan transek kuadrat disajikan pada gambar 12.



Gambar 10. Sketsa plot pengamatan transek kuadrat di lapangan (a) plot transek kuadrat 50 x 50 cm, (b) plot transek kuadrat 10 x 10 m menggunakan tali plastik.



Pengamatan kerapatan dilakukan dengan menghitung jumlah tegakan setiap jenis lamun di dalam transek kuadrat  $0.25 \text{ m}^2$  sehingga jumlah tegakan per satuan luas dapat diketahui. Penentuan persentase tutupan lamun dapat dilakukan dengan menggunakan pengamatan visual pada transek kuadrat secara langsung maupun melalui dokumentasi (*Underwater Photo Transect*) dengan standar tutupan lamun mengacu pada Rahmawati et al., (2014) dan McKenzie dan Campbell (2002). Tutupan dari 4 kisi dalam transek kuadrat diamati dan dicatat dengan melihat proyeksi penutupan lamun terhadap dasar perairan.

Persentase tutupan dari keempat kisi selanjutnya dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai persen tutupan plot transek kuadrat.

Penutupan lamun per jenis dihitung untuk menentukan jenis lamun yang paling dominan pada satu lokasi berdasarkan persentase penutupannya. Perhitungan penutupan lamun per jenis lamun dalam satu stasiun dengan menjumlahkan nilai persentase penutupan setiap jenis lamun pada setiap kuadrat seluruh transek dan membaginya dengan jumlah kuadrat pada stasiun tersebut. Status ekologi padang lamun ditentukan dengan metode *Seagrass Ecological Quality Index* (Hernawan et al. 2021).

#### **4.3.3 Sampling dan Analisis Data Makroinvertebrata**

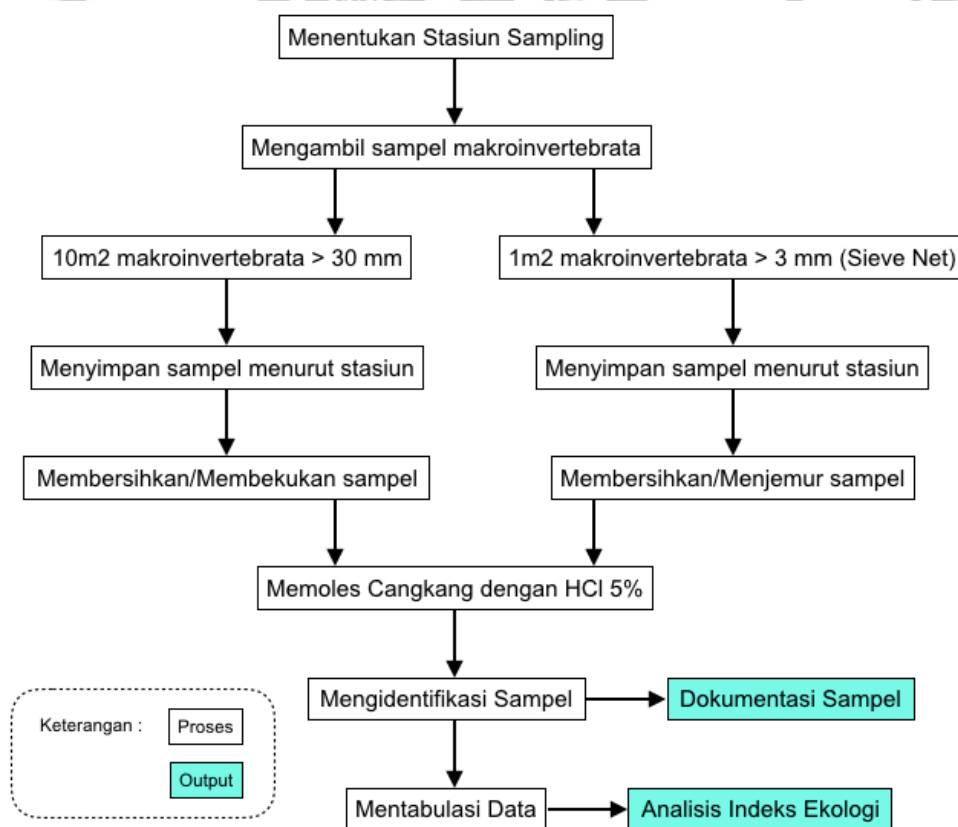
Pengambilan sampling dan penanganan makroinvertebrata asosiasi padang lamun dilakukan berdasarkan petunjuk Raz-Guzman & Grizzle (2001); Edgar, Mukai, & Orth (2001); Jarvis, Proctor, & Musk (2004); Sturm, Pearce, and Valdés (2006); Cordy and Cordy (2006); dan Geiger et al. (2007). Sampling komunitas makroinvertebrata menggunakan transek kuadrat pada stasiun yang sama dengan stasiun komunitas lamun diamati (gambar 10).

Berdasarkan pertimbangan habitat, mobilitas, dan ukuran makroinvertebrata maka dalam penelitian ini diaplikasikan 2 ukuran transek kuadrat untuk pelaksanaan sampling. Makroinvertebrata berukuran 2 – 30 mm



disampling pada transek kuadrat berukuran 1 m<sup>2</sup>. Untuk organisme berukuran diatas 30 mm plot pengamatan berukuran 100 m<sup>2</sup>. Pada transek kuadrat 1 m<sup>2</sup>, pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan skop untuk mengambil makroinvertebrata beserta substrat dan vegetasi lamunnya. Sampel yang didapatkan selanjutnya dipisahkan dari sedimen dengan sieve bertingkat dari 10, 8, 5, 4 hingga 2 mm (Geiger et al. 2007; Sturm, Mayhew, and Bales 2006; Sturm, Pearce, et al. 2006)

Sampel yang ditemukan ditempatkan dalam wadah yang diberi identitas sampel/stasiun dan pengawet (formalin 4%) untuk keperluan analisis, identifikasi jenis dan perhitungan selanjutnya. Makroinvertebrata berukuran > 30 mm dari plot yang sama disimpan dan dalam wadah plastik terpisah yang diberi kode yang sama dengan pasangannya pada plot kuadrat 1 m<sup>2</sup>. Proses sampling dan penanganan sampel ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 11. Skema proses sampling dan penanganan sampel makroinvertebrata



Sampel makroinvertebrata dari lapangan khususnya kelompok moluska (gastropoda dan bivalvia) dibersihkan dari lapisan alga dan sedimen yang menutupi warna dan corak asli cangkang. Selanjutnya dianginkan di bawah sinar matahari. Untuk sampel megabentos pembersihan jaringan hewan dari cangkang dapat dilakukan dengan metode perebusan perlahan-lahan maupun pembekuan untuk menghindari pembusukan (Dharma 1992; Sturm, Mayhew, et al. 2006; Sturm, Pearce, et al. 2006). Selanjutnya apabila diperlukan dapat cangkang dipoles dengan asam klorida 5%.

#### 4.3.4 Identifikasi Sampel

Identifikasi sampel dilakukan di Laboratorium Biologi Perairan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Borneo Tarakan. Identifikasi sampel berdasarkan sumber rujukan berikut:

Tabel 7. Rujukan identifikasi organisme makroinvertebrata yang ditemukan.

Kelompok Taksa	Rujukan Identifikasi
Lamun	Den Hartog (1970); McKenzie & Campbell (2002); Short <i>et al.</i> (2006); Waycott <i>et al.</i> (2004); el Shaffai (2011); dan Rahmawati et al. (2014) <a href="https://bioportal.naturalis.nl/?language=en">https://bioportal.naturalis.nl/?language=en</a>
Bivalvia	Dharma (1988); Dharma (1992); Susetiono (2004); (Colin and Arneson 1995) dan Dharma (2005) <a href="https://bioportal.naturalis.nl/?language=en">https://bioportal.naturalis.nl/?language=en</a> <a href="https://www.conchology.be">https://www.conchology.be</a> <a href="http://www.shellscarvalho.com">http://www.shellscarvalho.com</a> <a href="http://www.gastropods.com">http://www.gastropods.com</a> <a href="http://bigai.world.coocan.jp">http://bigai.world.coocan.jp</a>
Gastropoda	Dharma (1988); Dharma (1992); Susetiono (2004); Dharma (2005); (Colin and Arneson 1995) Aji <i>et al.</i> (2015) dan Aji <i>et al.</i> (2016) <a href="https://bioportal.naturalis.nl/?language=en">https://bioportal.naturalis.nl/?language=en</a> <a href="https://www.conchology.be">https://www.conchology.be</a> <a href="http://www.shellscarvalho.com">http://www.shellscarvalho.com</a> <a href="http://www.gastropods.com">http://www.gastropods.com</a> <a href="http://bigai.world.coocan.jp">http://bigai.world.coocan.jp</a>
Echinodermata	(Colin and Arneson 1995); (Purcell, Samyn, and Conand 2012) Susetiono (2004); dan Dermawan <i>et al.</i> (2015)

Hasil identifikasi dikelompokkan menurut taksa dan disusun menurut hirarki taksonomi Linnaeus. Selanjutnya dilakukan pengecekan validitas nama ilmiah secara online di website dari World Register of Marine Species (WORMS) <http://marinespecies.org>



#### 4.3.5 Sampling dan Analisis Data Parameter Lingkungan

Pada penelitian ini dilakukan kuantifikasi parameter lingkungan yang terdiri atas variabel fisik dan kimia. Secara garis besar terdapat 2 kelompok variabel fisik dan kimia yang diukur yaitu variabel fisik-kimia yang diukur in situ dan variabel yang dianalisis menggunakan instrumentasi kimia analitik maupun pengujian fisik di laboratorium. Adapun kelompok parameter yang diukur langsung di lapangan antara lain; suhu, salinitas, oksigen terlarut, dan pH. Sementara itu kelompok parameter yang disampling untuk keperluan analisa di laboratorium antara lain; *Total Suspended Solid* (TSS), Nitrat, Fosfat, dan Sedimen. Prosedur pengukuran parameter fisik kimia perairan yang akan dilakukan sebagai berikut:

##### a. Suhu

Suhu diukur secara langsung di lapangan pada setiap lokasi plot pengamatan dengan menggunakan thermometer digital. Sensor dari thermometer digital dicelupkan selama beberapa saat di kolom perairan hingga menunjukkan angka yang stabil sebagai suhu terukur. Sebagai kontrol juga digunakan thermometer merkuri untuk mengukur suhu sebagai antisipasi bila thermometer digital mengalami kendala di lapangan.

##### b. Salinitas

Salinitas diukur secara langsung di lapangan pada setiap lokasi plot pengamatan dengan menggunakan *waterchecker*. Sensor dari *waterchecker* dicelupkan selama beberapa saat di kolom perairan hingga menunjukkan angka yang stabil sebagai salinitas terukur. Handrefraktometer juga digunakan untuk mengukur salinitas sebagai control dan antisipasi bila *waterchecker* mengalami kendala.



c. pH

pH diukur secara langsung di lapangan pada setiap lokasi plot pengamatan dengan menggunakan waterchecker. Sensor dari waterchecker dicelupkan selama beberapa saat di kolom perairan hingga menunjukkan angka yang stabil sebagai pH terukur.

d. Oksigen Terlarut

Oksigen terlarut diukur secara langsung di lapangan pada setiap lokasi plot pengamatan dengan menggunakan waterchecker. Sensor dari waterchecker dicelupkan selama beberapa saat di kolom perairan hingga menunjukkan angka yang stabil sebagai oksigen terlarut.

e. *Total Suspended Solid (TSS)*

TSS merupakan residu dari padatan total yang tidak lolos oleh saringan dengan ukuran maksimal 2  $\mu\text{m}$ . Di perairan TSS tersusun atas lumpur, tanah liat, logam oksida, sulfida, ganggang, bakteri dan jamur. TSS memberikan kontribusi untuk kekeruhan (turbidity) dengan membatasi penetrasi cahaya untuk fotosintesis dan visibilitas perairan. TSS diukur dengan mengambil sampel dari kolom perairan pada setiap stasiun dengan menggunakan botol sampel (min 250 ml) untuk analisa di laboratorium berdasarkan SNI 06-6989.3-2004 (Badan Standardisasi Nasional 2004). Sampel uji dihomogenkan kemudian disaring dengan kertas saring yang telah dikeringkan dan ditimbang massa awalnya. Residu yang tertahan pada kertas saring dikeringkan pada suhu 103°C sampai dengan 105°C kemudian ditimbang kembali. Selisih massa kertas saring sebelum dan setelah penyaringan merupakan nilai padatan tersuspensi total (TSS) per volume sampel air tersaring.



f. Nitrat ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )

Nitrat merupakan bentuk utama nitrogen pada perairan alami dan merupakan nutrisi utama bagi pertumbuhan produsen primer. Nitrat sangat mudah larut dan bersifat stabil dalam air. Dalam penelitian ini kandungan nitrat yang diukur berasal dari kolom air dan air pori sedimen (interstisial) tumbuhnya lamun. Sampel air permukaan diambil dengan menggunakan botol sampel dimana sebelum air diambil botol sampel terlebih dahulu dibilas dengan air laut di stasiun sampling untuk mencegah kontaminasi.

Selanjutnya sampling air kolom dilakukan dengan membuka botol di kolom air. Adapun untuk air pori, maka pengambilan sampel dilakukan dengan *pore water sampler* yang digunakan untuk mengambil air pori sedimen pada kedalaman 5 – 7 cm dari permukaan substrat. Selanjutnya kedua botol sampel diberi kode, dan disimpan dalam cool box untuk dianalisa lebih lanjut di laboratorium.

Prosedur analisis Nitrat ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) dengan metode Brucine (EPA 1971).

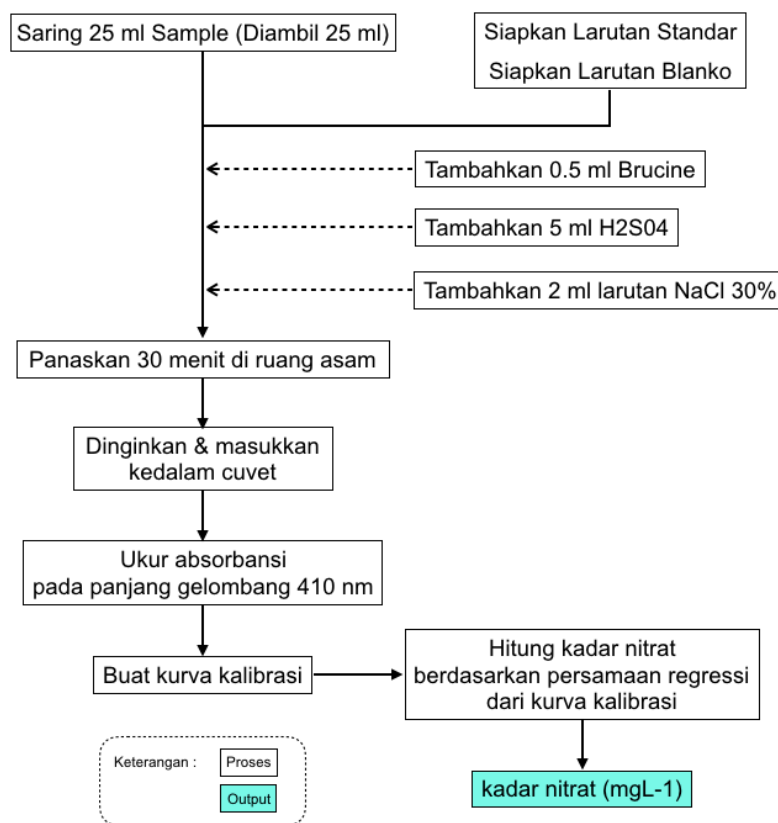
Sebanyak 25 – 50 ml air sampel disaring dengan kertas whatman no. 42.

Kemudian, mengambil air sampel sebanyak 0,5 ml air dengan menggunakan pipet, dan memasukkannya ke dalam tabung reaksi. Setelah itu menambahkan 0,5 ml brucine, lalu aduk dan biarkan selama 2-4 menit.

Lalu menambahkan 5 ml asam sulfat pekat (di ruang asam) sambil diaduk dan biarkan sampai dingin. Setelah siap ukur absorbansi sampel, larutan standar, dan blanko dengan spektrofotometer UV-Visibel pada panjang gelombang 410 nm. Bagan prosedur analisis Nitrat ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) dengan metode

Brucine ditunjukkan pada gambar 12.



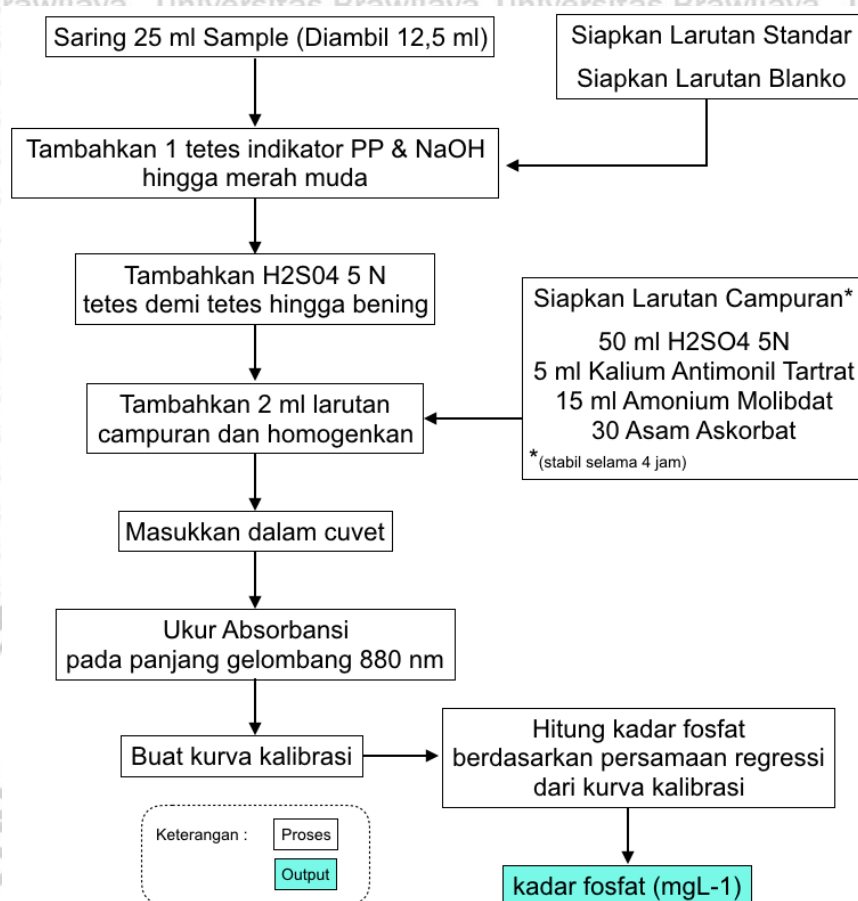


Gambar 12. Prosedur analisis Nitrat ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) metode Brucine (EPA 1971).

g. Fosfat ( $\text{PO}_4$ )

Sebagai nutrient penting di perairan, fosfat/fosfor ditemukan bentuk senyawa organik yang terlarut (ortofosfat dan polifosfat) dan partikulat. Ortofosfat merupakan bentuk fosfor yang dapat langsung dimanfaatkan oleh tumbuhan akuatik, sedang polifosfat harus direduksi dulu menjadi ortofosfat sebelum dimanfaatkan. Sebagaimana nitrat, fosfat dalam penelitian ini diukur pada kolom air dan air pori sedimen. Prosedur yang dijalankan saat pengambilan sampel air permukaan dan air pori di lapangan untuk pengukuran kadar nitrat dan fosfat tidak berbeda. Prosedur analisis fosfat ( $\text{PO}_4$ ) mengacu SNI 06-6989.31-2005 cara uji nitrat ( $\text{PO}_4$ ) dengan spektrofotometer secara asam askorbat (Badan Standardisasi Nasional 2005). Bagan prosedur analisis Fosfat ( $\text{PO}_4$ ) dengan metode asam askorbat ditunjukkan pada gambar 13.





Gambar 13. Prosedur analisis fosfat secara asam askorbat berdasarkan SNI 06-6989.31-2005 (Badan Standardisasi Nasional 2005).

#### h. Potensial Reduksi Oksidasi (ORP/*Oxidation Reduction Potential*)

Potensial reduksi oksidasi  $E_h$  adalah ukuran kuantitatif dari kapasitas suatu zat atau sistem biogeokimia untuk menerima atau menyumbangkan elektron.

Potensial redoks dinyatakan dalam satuan milivolt (mV) dan diukur dengan menggunakan ORP meter. Tabel 8 menunjukkan kategori kecenderungan kondisi perairan berdasarkan rentang nilai  $E_h$  menurut (Holmer, Wildish, and Hargrave 2005)

Tabel 8. Klasifikasi kisaran nilai potensial reduksi oksidasi ( $E_h$ ) di perairan

Kisaran nilai $E_h$	Kategori
$E_h > 200$ mV	Oksidasi
$0 - 200$ mV	Transisi
$E_h < 0$ mV	Reduksi



Sebagai variabel lingkungan,  $E_h$  digunakan untuk mengkarakterisasi kapasitas reduksi atau oksidasi sedimen (Søndergaard 2009; Werorilangi et al. 2016).  $E_h$  merupakan sebagai indikator status oksigenasi dan kandungan toksik di sedimen (Tokarz and Urban 2015; Werorilangi et al. 2016).

i. Jenis dan Tekstur sedimen

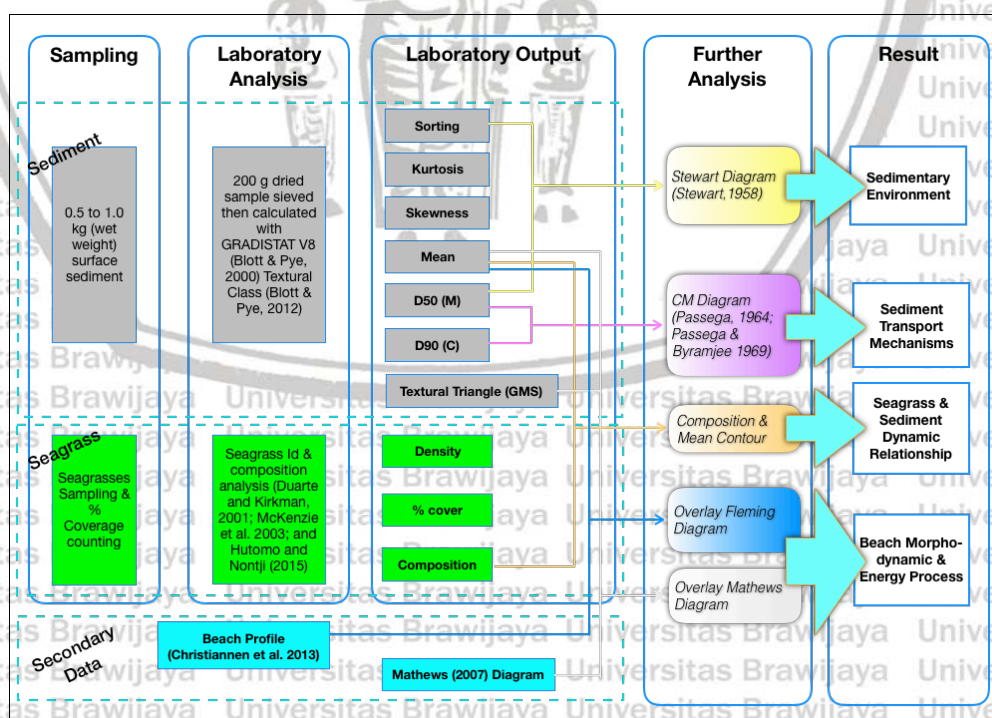
Analisa jenis dan tekstur sedimen bertujuan untuk menentukan sejauh mana dinamika maupun tingkat stabilitas substrat dari pengaruh hidrodinamika perairan. Untuk itu diperlukan pemisahan sedimen dari setiap stasiun menurut persentase kontribusi fraksi ukuran butirnya. Pengelompokan fraksi butir sedimen dalam penelitian ini berdasarkan pada pembagian sedimen klastik oleh Blott and Pye (2001) yang merinci lebih lanjut dari pembagian kelas butir sedimen oleh Udden (1914) dan Wentworth (1922).

Tabel 9. Klasifikasi kelas butir sedimen Skala Wentworth (1922), Friedman and Sanders (1978), terhadap GRADISTAT (Blott and Pye 2001)

Ukuran Butir		Deskripsi Terminologi		
mm/ $\mu$ m		Udden (1914) and Wentworth (1922)	Friedman And Sanders (1978)	program GRADISTAT (Blott & Pye, 2001)
2048	mm	Kerakal	Bongkahan sangat besar	
1024			Bongkahan besar	Bongkahan sangat besar
512			Bongkahan sedang	Bongkahan besar
256			Bongkahan kecil	Bongkahan sedang
128			Kerakal besar	Bongkahan kecil
64			Kerakal kecil	Bongkahan sangat kecil
32		Kerikil	Kerikil sangat kasar	Kerikil sangat kasar
16			Kerikil kasar	Kerikil kasar
8			Kerikil sedang	Kerikil sedang
4			Kerikil halus	Kerikil halus
2	butiran	butiran	Kerikil sangat halus	Kerikil sangat halus
1		Pasir sangat kasar	Pasir sangat kasar	Pasir sangat kasar
500	$\mu$ m	pasir kasar	pasir kasar	pasir kasar
250		pasir sedang	pasir sedang	pasir sedang
125		pasir halus	pasir halus	pasir halus
63		pasir sangat halus	pasir sangat halus	pasir sangat halus
31		Lanau	Lanau sangat kasar	Lanau sangat kasar
16			Lanau kasar	Lanau kasar
8			Lanau sedang	Lanau sedang
4			Lanau halus	Lanau halus



Analisis fraksi butir sedimen menggunakan sieve net mengacu pada metode ASTM D6913 (ASTM 2017) untuk fraksi berukuran 75 mm hingga 75  $\mu\text{m}$ . Sampel sedimen dari lapangan dibersihkan dari kotoran dan material non sedimen selanjutnya dikeringkan. Sebanyak 100 gram sampel sedimen ditimbang sebagai massa awal, kemudian dimasukkan ke dalam sieve net bertingkat dengan ukuran >2 mm, 2-1 mm, 1-0,5 mm, 0,5-0,25 mm, 0,25-0,125 mm, 0,125-0, 625 mm, dan <0,0625 mm. Selanjutnya mengayak sampel sehingga didapatkan pemisahan partikel sedimen yang tertahan pada setiap saringan. Sampel sedimen yang telah dipisahkan oleh sieve net, ditimbang massanya. Rangkaian proses sampling, analisis laboratorium dan analisis *provenance* untuk mengungkap mekanisme transpor, karakteristik lingkungan pengendapan, morfodinamika pantai dan hubungan antara tekstur sedimen terhadap jenis lamun disajikan pada gambar 14 di bawah ini.



Gambar 14. Bagan alir analisis tekstur sedimen



Analisis parameter butir sedimen (mean, standard deviation/sorting, skewness and kurtosis) dilaksanakan dengan bantuan perangkat lunak Gradistat v.8.0 (Blott and Pye 2001). Klasifikasi butir dan jenis sedimen ditentukan dengan merujuk klasifikasi tekstur Blott & Pye (2012). Mekanisme transport sedimen dianalisis dengan menggunakan CM bivariate plot (Passegga 1964; Passegga and Byramjee 1969). Teknik ini mengkaji hubungan antara kondisi pengangkutan sedimen laut terhadap parameter butir sedimen. C mewakili persentile pertama (C99) sementara M adalah median parameter butir sedimen. Passegga (1964) menggunakan C99 sebagai nilai C, dalam penelitian ini digunakan D90 sebagaimana disarankan oleh Nugroho & Putra (2019).

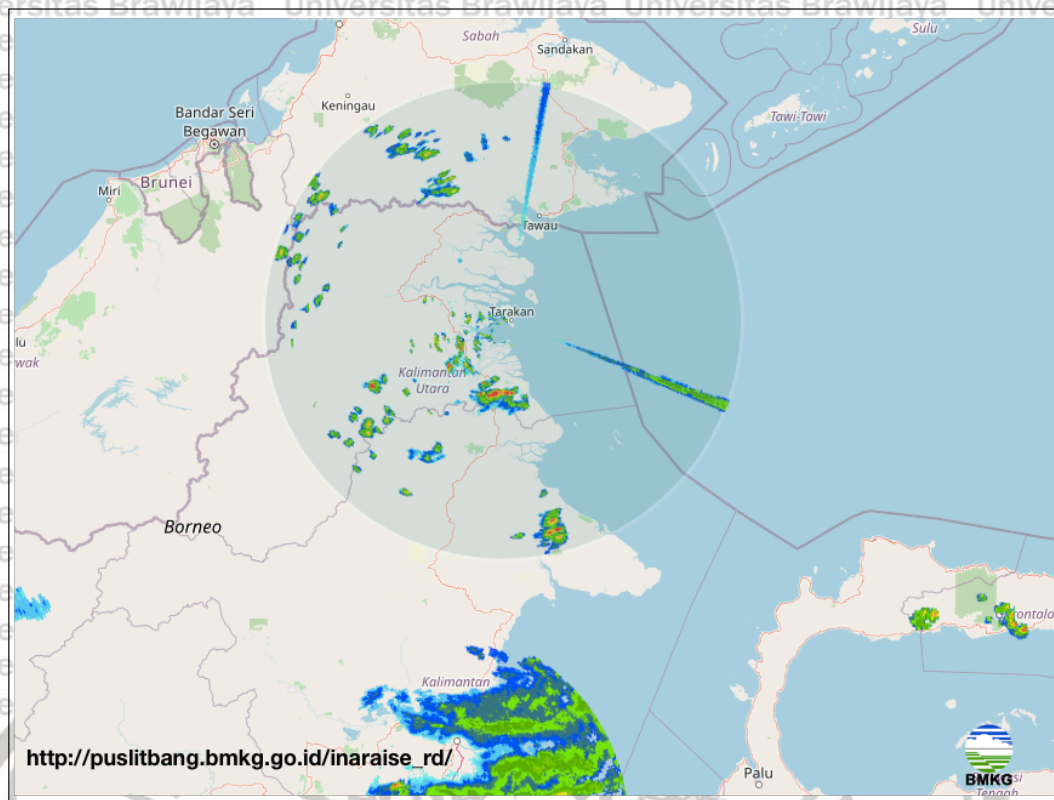
#### 4.4 Analisis Data

Data primer dan maupun sekunder yang diperoleh baik melalui tahapan identifikasi dan tabulasi selanjutnya dianalisis lebih lanjut berdasarkan kelompok data berikut:

##### 4.4.1 Analisis Angin Monsunal

Data vektor angin dalam penelitian ini merupakan data arah dan kecepatan angin jam-jaman (hourly) periode perekaman tahun 2010 – 2018 stasiun Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG) stasiun meteorologi bandara Juwata Kota Tarakan yang diperoleh melalui website [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru). Data meteorologi pada stasiun klimatologi merupakan hasil perekaman dari Radar Cuaca Doppler dengan jarak radius jangkauan mencapai 240 km (BMKG 2021).





Gambar 15. Coverage Radar Cuaca Stasiun BMKG Tarakan, Kalimantan Utara. Radius sapuan *Doppler Radar* menjangkau sejauh 240 Km dari stasiun meteorologi bandar udara Juwata di Kota Tarakan (BMKG 2021).

Analisis statistik angin dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak WRPLOT View™ Version 8.0.2 (Environmental Lakes 2020). Program ini membantu perhitungan statistik angin dalam periode tertentu yang dapat dibreakdown pada rentang waktu tertentu semisal bulan atau tahun tertentu.

Kelas kecepatan angin yang digunakan merujuk pada kriteria WMO (World Meteorological Organization 1998, 2008) yang equivalent dengan skala Beaufort.

Angin merupakan besaran vektor karena memiliki nilai dan arah. Kecepatan angin menunjukkan besarnya nilai dan arah menunjukkan arah dari mana datangnya angin. Arah dan kecepatan merupakan resultan dari vektor komponen  $v_x$  dan  $v_y$  terhadap titik acuan dimana komponen  $v_x$  merupakan sejajar sumbu x atau arah timur (-) – barat (+), sedangkan  $v_y$  sejajar sumbu y atau utara (-) selatan (+).



Output analisa WRPLOT View™ berupa Windrose, Histogram, Frequency Count, and Frequency Distribution. Windrose menunjukkan frekuensi kejadian angin pada kurun waktu tertentu dari setiap arah angin berdasarkan kelas kecepatannya. Dalam penelitian ini digunakan pengelompokan 16 arah mata angin untuk melihat variabilitas arah angin yang lebih rinci dibandingkan penggunaan 4 atau 8 arah mata angin. Untuk melihat variabilitas vektor angin, windrose dibuat dalam skala bulanan. Selanjutnya untuk melihat kaitan pola angin dengan siklus monsoonal, maka windrose dikelompokkan berdasarkan periode musiman yaitu DJF (Desember – Februari) mewakili periode Asian Monsoon, MAM (Maret – Mei) transisi I, JJA (Juni – Agustus) Australian Monsoon dan SON (September – Nopember) transisi II. Persentase frekuensi distribusi angin dari keenam belas arah mata angin dihitung untuk selanjutnya dibandingkan dari setiap periode.

Penentuan karakteristik monsoonal dihitung berdasarkan kriteria pembalikan anign antara Januari dan Juli kemudian dilanjutkan dengan perhitungan Indeks Monsoon berdasarkan Khromov (1957) sebagai berikut;

$$I_{kh} = (F_{Jan} + F'_{July})/2 \quad (1)$$

Dimana;

$I_{kh}$  : Indeks Monsoon Khromov

$F_{Jan}$  : Jumlah total frekuensi angin dominan bulan januari

$F'_{July}$  : Jumlah total frekuensi angin dominan bulan juli

Indeks Monsoon umumnya dihitung berdasarkan arah angin dominan dari 8 arah mata angin atau pembagian per 45°. Oleh karena arah mata angin dalam penelitian ini dibagi menjadi 16 arah atau per 22.5°, maka perhitungan didasarkan frekuensi angin kumulatif 2 arah dominan yang berdekatan pada bulan januari dan juli. Khromov (1957) menetapkan nilai Monsoon Index



sekurang-kurangnya 40% frekuensi total angin pada kawasan yang bersifat monsoonal. Ramage (1971) menambahkan kriteria indeks dengan kecepatan angin dominan untuk delineasi wilayah beriklim monsun.

#### 4.4.2 Analisis Monsoonal Wave Climate

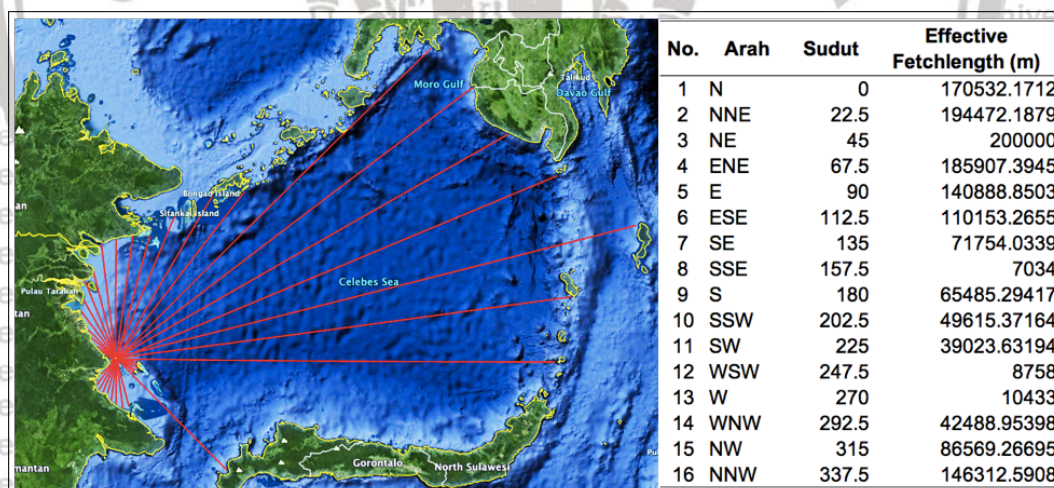
Pemodelan gelombang bertujuan untuk menghasilkan karakteristik gelombang yang meliputi tinggi, periode, dan arah datang gelombang secara spasial dan temporal. Analisis gelombang dengan metode Coastal Engineering Manual/CEM USACE (Coastal Engineering Research Center 1984; USACE 2008, 2015). Metode CEM merupakan revisi dan pengembangan dari metode SMB dan SPM 1984 yang direkomendasikan dalam banyak literatur teknik/dinamika pantai (Hidayati 2017; Triatmodjo 2008, 2009; World Meteorological Organization 1998). Kajian komparasi Hamza, Lusito dan Alessandro (2018) menyimpulkan bahwa pada perairan dangkal, model hindcasting SPM 1984 memiliki kedekatan dengan hasil ADCP dibanding model lainnya. Model hindcasting SPM 1984 membutuhkan data komponen pembangkit gelombang antara lain vektor (arah dan kecepatan) angin, durasi angin, dan jarak fetch medan angin pembangkit gelombang (Hidayati 2017; Triatmodjo 2008, 2009).

*Wave Climate* adalah rerata distribusi dari tinggi, periode dan arah dari gelombang pada suatu lokasi dalam jangka waktu tertentu. Pemodelan gelombang menggunakan teknik hindcasting berdasarkan metode CEM yang dikembangkan oleh US Army Corps of Engineer (Coastal Engineering Research Center 1984; USACE 2008, 2015). Dalam metode ini data angin ditransformasikan menjadi data gelombang terbangkit angin melalui perhitungan *effective fetch length* dan *windstress factor*. *Effective fetch length* secara teknis merupakan jarak antara dua titik dimana angin berhembus tanpa rintangan dan tidak mengalami perubahan arah maupun kecepatan secara signifikan.



Sementara *windstress factor* atau faktor tegangan angin merupakan data kecepatan angin yang telah melewati proses koreksi (koreksi ketinggian, durasi, stabilitas dan efek lokasi).

Data vektor angin dan klimatologi diperoleh dari Stasiun Meteorologi Kelas III Bandar Udara Juwata Tarakan Kalimantan Utara berupa data dengan interval perekaman setiap jam. Data serupa dapat pula diperoleh melalui BMKG Pusat (Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika), NCEI NOAA (National Center for Environmental Information – National Oceanic and Atmospheric Administration) sebelumnya dikenal dengan nama NCDC NOAA dan ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast). Panjang data yang digunakan minimal 5 tahun terakhir (2014 – 2018). Data vektor angin selanjutnya ditabulasi secara kronologis tersusun atas tahun, bulan, tanggal, jam perekaman data angin (format 00 - 23), arah ( $^{\circ}$  Azimuth), dan kecepatan ( $\text{ms}^{-1}$ ).



Gambar 16. Distribusi fetch (garis merah) pembangkitan gelombang Pulau Panjangan dari setiap arah mata angin dominan. Garis-garis merah pada Googleearth<sup>TM</sup> menggambarkan *actual groundlength* dari panjang fetch pembangkitan gelombang sementara tabel menunjukkan hasil kalkulasi *effective fetchlength*.

Analisa gelombang dilakukan dengan perhitungan panjang fetch efektif ( $F_{\text{eff}}$ ). Fetch efektif adalah panjang daerah di permukaan laut dimana arah dan



kecepatan angin relatif stabil untuk pembangkitan gelombang. Fetch awal ditentukan dengan bantuan perangkat lunak Google Earth Pro for Mac versi 7.3.2.5776 (64-bit) © 2019 Google LLC. Selanjutnya dikoreksi untuk mendapatkan panjang fetch efektif.

a. Perhitungan Panjang Fetch efektif (*Effective Fetchlength*)

$$F_{eff} = \frac{\sum X_i \cos \alpha}{\sum \cos \alpha} \quad (2)$$

Keterangan:

- $F_{eff}$  : Panjang Fetch efektif  
 $X_i$  : Panjang segmen fetch ke i  
 $\alpha$  : Deviasi kedua sisi dari arah angin, (interval 6° - 42°)

b. Koreksi kecepatan angin

Mengingat pengukuran angin oleh Stasiun Meteorologi Bandar Udara Juwata Tarakan berada di daratan, sementara dalam rumus-rumus pembangkitan gelombang data angin yang digunakan adalah yang ada di atas permukaan laut, maka diperlukan koreksi data angin di atas daratan ke data angin di atas permukaan laut. Hubungan tersebut diberikan oleh persamaan berikut ini:

$$R_L = U_w / U_L \quad (3)$$

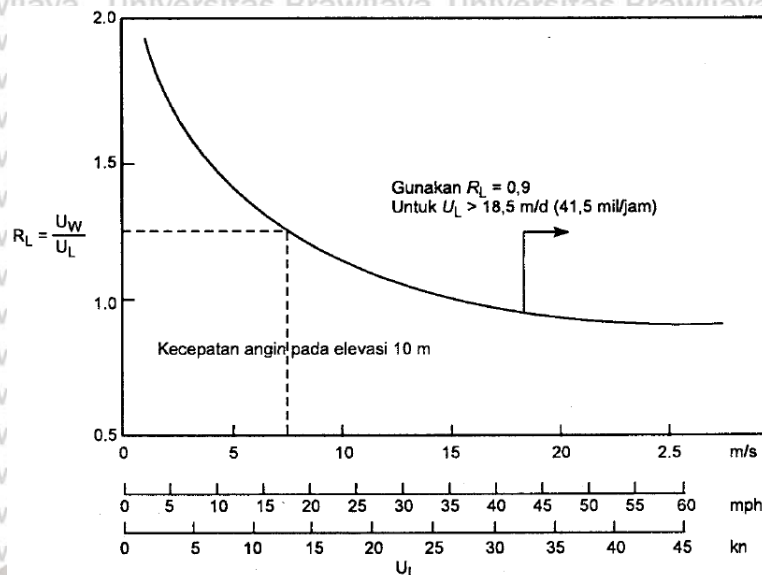
Dimana :

$R_L$  : Rasio kecepatan angin di laut dan terukur di darat (gambar 17)

$U_w$  : Kecepatan angin di laut (m/s)

$U_L$  : Kecepatan angin yang diukur di darat (m/s)





Gambar 17. Relasi kecepatan angin di laut dan di darat (Triatmodjo 2008, 2009)

c. Perhitungan nilai faktor tegangan angin (*wind stress factor*)

Persamaan pembangkitan gelombang dinyatakan dalam faktor tegangan angin. Setelah nilai konversi kecepatan angin  $R_L$  (0.71) diperoleh. Selanjutnya kecepatan angin dikonversi menjadi faktor tegangan angin untuk pembangkitan gelombang dengan persamaan sebagai berikut:

$$U_A = 0,71 U_W^{1.23} \quad (4)$$

Dimana :

$U_A$  : faktor tegangan angin ( $\text{ms}^{-1}$ )

$U_W$  : Kecepatan angin di laut ( $\text{ms}^{-1}$ )

d. Perhitungan tinggi dan periode gelombang nanti

Selanjutnya analisa gelombang dilakukan dengan metode CEM USACE.

Hasil peramalan gelombang ini berupa tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang. Terdapat beberapa persamaan dalam metode CEM USACE yang digunakan sesuai dengan karakteristik perairan yang dikaji antara lain :



- Pada kondisi fetch terbatas

$$\frac{gH_{m_0}}{u_*^2} = 4.13 \times 10^{-2} \left( \frac{gX}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

dengan periode

$$\frac{gT_p}{u_*} = 0.651 \left( \frac{gX}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_D = \frac{u_*^2}{U_{10}^2}$$

$$C_D = 0.001(1.1 + 0.035U_{10}) \quad (6)$$

- Pada perairan dalam dimana gelombang terbentuk sempurna

$$\frac{gH_{m_0}}{u_*^2} = 2.115 \times 10^2 \quad (7)$$

dengan periode

$$\frac{gH_{m_0}}{u_*^2} = 2.115 \times 10^2 \quad (8)$$

Dengan ketentuan

$g$  : percepatan gravitasi ( $9,81 \text{ ms}^{-2}$ )

$X$  : panjang fetch efektif (m)

$H_{m_0}$  : energy-based significant wave height (m)

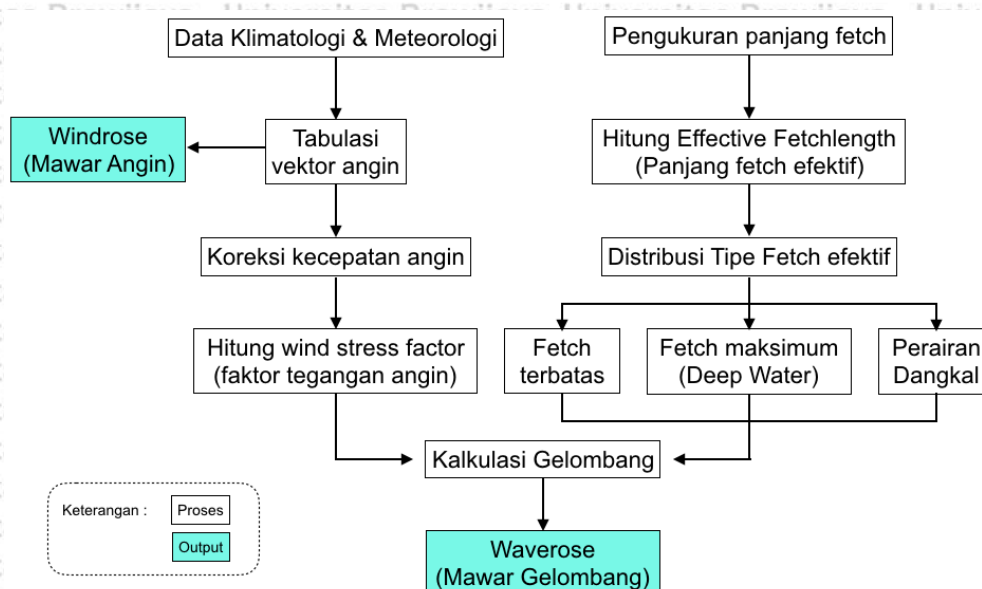
$C_D$  : drag coefficient

$U_{10}$  : Kecepatan angin (m/detik)

$u^*$  : friction velocity (m/detik)



Ringkasan proses pemodelan gelombang disajikan pada gambar 18 berikut



Gambar 18. Skema langkah-langkah pemodelan gelombang berdasarkan metode hindcasting (Coastal Engineering Research Center 1984; USACE 2008, 2015)

#### e. Visualisasi Model Distribusi Spasial dan Temporal Gelombang

Data angin dan gelombang yang telah ditabulasi dan dikalkulasi dalam format MS-Excel (\*.xlsx) selanjutnya diekspor kedalam aplikasi WRPLOT™ (Wind Rose Plots for Meteorological Data) Version 8.02 dengan mencantumkan identifikasi sumber data stasiun beserta informasi georeferensi (latitude – longitude). Selanjutnya dilakukan transformasi data ke format SAMSON (\*.sam) agar dapat dibaca dan diolah aplikasi. Output analisa berupa model distribusi spasio-temporal arah angin, kecepatan angin, tinggi gelombang, beserta histogram % probabilitas kejadian menurut kelas kecepatan angin dan/atau tinggi gelombang.

Hasil perhitungan berupa tinggi gelombang signifikan ( $H_{m0}$ ) berdasarkan energi angin pembangkitnya. Selanjutnya data tinggi gelombang diplotkan ke waverose dengan bantuan WRPLOT View™ Version 8.0.2 (Environmental Lakes 2020). Sebagaimana analisis angin pada bagian sebelumnya, analisis



Waverose juga menghasilkan statistik gelombang pada rentang waktu tertentu (bulanan, musiman dan tahunan). Kelas tinggi gelombang yang digunakan merujuk pada kelas tinggi gelombang BMKG dan WMO (1998) yang equivalent dengan Douglass Sea State/wave scale.

Output analisa WRPLOT View™ berupa Waverose, Histogram, Frequency Count, dan Frequency Distribution. Waverose menunjukkan statistik tinggi gelombang signifikan dari 16 arah datang gelombang berdasarkan kelas tinggi gelombang. Untuk melihat variabilitas temporal gelombang, waverose dibuat dalam skala bulanan. Selanjutnya untuk mengetahui keterkaitan pola monsoonal terhadap variabilitas gelombang, maka waverose dikelompokkan berdasarkan periode musiman yaitu DJFM (Desember – Maret) mewakili periode Asian Winter Monsoon, AM (April – Mei) transisi I, JJAS (Juni – September) Australian Summer Monsoon dan ON (Oktober – Nopember) transisi II.

Distribusi tinggi gelombang signifikan ( $H_{m0}$ ) musiman dipetakan dengan bantuan Surfer 13. Selain tinggi gelombang signifikan output analisa juga berupa Periode gelombang ( $t$ ) yang dalam hal ini digunakan untuk memvalidasi tinggi gelombang. Tinggi dan Periode gelombang memiliki hubungan matematis dimana Tinggi dan Periode saling membatasi serta menjadi batasan kalsifikasi tinggi gelombang sebagaimana ditunjukkan oleh Holthuijsen (2007).



#### 4.4.3 Analisis Data Komunitas Lamun

##### a. Kerapatan Jenis

Kerapatan jenis adalah jumlah tegakan lamun per satuan luas. Kerapatan jenis lamun pada setiap titik pengamatan dihitung dengan rumus berikut:

$$Di = ni / A \quad (9)$$

Dimana :

$Di$  : Kerapatan jenis (tegakan/m<sup>2</sup>)

$ni$  : Jumlah total tegakan spesies i (tegakan)

$A$  : Luas daerah sampling (m<sup>2</sup>)

##### b. Kerapatan Jenis Relatif (KR<sub>i</sub>)

Kepadatan relatif adalah perbandingan antara jumlah individu jenis dan jumlah total individu seluruh jenis. Kerapatan relatif dihitung dengan rumus berikut :

$$RDi = \frac{ni}{\sum n} \times 100 \quad (10)$$

Di mana :

$RDi$  : Kepadatan relatif

$ni$  : Jumlah total tegakan spesies i (tegakan)

$\sum n$  : Jumlah total individu seluruh jenis

##### c. Persentase Tutupan Lamun

Persentase tutupan lamun terdiri dari 3 jenis perhitungan yaitu; persentase tutupan total, tutupan per stasiun, dan tutupan jenis. Persentase tutupan lamun total dihitung sebagai rerata tutupan dari semua jenis lamun pada plot transek kuadrat. tutupan lamun dihitung berdasarkan Rahmawati et al. (2014), dengan rumus berikut :



$$\% \text{ tutupan lamun} = \sum \% \text{ tutupan dari 4 kisi kuadrat} / 4 \quad (11)$$

Dimana :

4 : Jumlah kisi transek kuadrat

Selanjutnya rerata tutupan lamun per stasiun dihitung dengan persamaan :

$$\% \text{ Rerata tutupan lamun} = \sum \% \text{ tutupan semua kuadrat} / 5 \quad (12)$$

Dimana :

5 : Jumlah total transek kuadrat per stasiun

Tutupan jenis lamun setiap stasiun dihitung dengan persamaan berikut :

$$\% \text{ tutupan jenis} = \sum \text{tutupan jenis lamun pada seluruh kuadrat} / 5 \quad (13)$$

Dimana :

5 : Jumlah total transek kuadrat per stasiun

#### d. **Seagrass Ecological Quality Index (SEQI)**

Perhitungan indeks kualitas ekologi lamun dihitung berdasarkan formulasi

Hernawan et al (2021) :

$$\text{SEQI} = (\text{St}/\text{Sref}) \cdot 0.2 + (\text{Ct}/\text{Cref}) + (\text{Wt}/\text{Wref}) \cdot 0.2 + (1 - (\text{Mt}/\text{Mmax})) \cdot 0.2 + (1 - (\text{Et}/\text{Emax})) \cdot 0.2 \quad (14)$$

Dimana :

St : seagrass species richness observed

Sref : max value of seagrass species richness (9)

Ct : seagrass percent cover observed

Cref : max value of seagrass percent cover (100)

Wt : water transparency observed

Wref : max value of water transparency (2)

Mt : macroalga percent cover observed

Mmax : max value of macroalga percent cover (100)

Et : epiphyte percent cover observed

Emax : max value of epiphyte percent cover (100)



#### 4.4.4 Analisis Data Komunitas Makroinvertebrata

##### a. Kepadatan

Kepadatan jenis-jenis makroinvertebrata dihitung dengan menggunakan rumus Soegianto (1994) :

$$Di = ni / A \quad (15)$$

Dimana :

$Di$  : Kelimpahan spesies  $i$  (ind  $m^{-2}$ )

$ni$  : Jumlah total individu spesies  $i$  (tegakan)

$A$  : Luas daerah sampling ( $m^2$ )

##### b. Indeks Keanekaragaman spesies ( $H'$ )

Indeks keanekaragaman spesies menyatakan ukuran kuantitatif dari banyaknya spesies yang berbeda dalam suatu komunitas. Indeks keanekaragaman yang umum digunakan adalah indeks Shannon-Wiener (Shannon 1948; Spellerberg and Fedor 2003) dengan persamaan:

$$H' = \sum_{i=1}^S Pi \ln Pi \quad (16)$$

dimana :

$H'$  : Indeks keanekaragaman

$Pi$  : Perbandingan proporsi ke  $i$

$S$  : Jumlah spesies yang ditemukan

Indeks keanekaragaman digolongkan dalam kriteria sebagai berikut (Madduppa 2007) :

$H' \leq 2$  : Keanekaragaman kecil

$2 < H' \leq 3$  : Keanekaragaman sedang

$H' > 3$  : Keanekaragaman tinggi.



### c. Indeks Keseragaman (Evenness)

Indeks keseragaman atau equitabilitas ( $e$ ) memberi gambaran penyebaran individu antar spesies yang berbeda dan diperoleh dari hubungan antara keanekaragaman ( $H'$ ) dengan keanekaragaman maksimalnya. Semakin merata penyebaran individu antar spesies maka keseimbangan ekosistem akan makin meningkat. Indeks yang digunakan adalah indeks keseragaman Pielou, (1966) yang dirumuskan sebagai berikut.

$$J' = H'/H'_{\text{maks}} \quad (17)$$

dimana :

$J'$  : Indeks keseragaman Pielou

$H'$  : Indeks Keanekaragaman

$H'_{\text{maks}}$  :  $\ln S$

$S$  : Jumlah spesies yang ditemukan

Nilai indeks keseragaman berkisar antara 0 – 1, dimana semakin mendekati 1 maka keseragaman semakin baik (Kvålseth 2015; Pielou 1966; Soegianto 1994). Adapun kategori nilai indeks keseragaman sebagai berikut

(Madduppa 2007) :

$0 < E \leq 0.5$  : Komunitas tertekan

$0.5 < E \leq 0.75$  : Komunitas labil

$0.75 < E \leq 1$  : Komunitas stabil

### d. Indeks Dominansi (D)

Indeks dominansi dihitung untuk mengetahui tingkat dominasi kelompok biota/spesies tertentu. Persamaan yang digunakan adalah indeks dominansi

(Simpson 1949) yaitu :

$$\lambda = \sum_{i=1}^S (P_i)^2 \quad (18)$$

dimana :



$\lambda$  : Indeks dominansi

$P_i$  : Perbandingan proporsi spesies ke  $i$

$S$  : Jumlah spesies yang ditemukan

Indeks dominansi ( $\lambda$ ) berada pada rentang 0 – 1 (Simpson 1949). Semakin mendekati 1 nilai indeks menunjukkan adanya biota yang mendominasi komunitas. Nilai indeks dominansi diinterpretasikan dalam 3 kriteria, yaitu berikut (Madduppa 2007) :

$0 < \lambda \leq 0.5$  : Dominansi rendah

$0.5 < \lambda \leq 0.75$  : Dominansi sedang

$0.75 < \lambda \leq 1$  : Dominansi tinggi

Kombinasi indeks Shannon-Wiener ( $H'$ ), Pielou ( $J'$ ), dan Simpson ( $\lambda$ ) dipilih karena ketiga indeks saling melengkapi (Morris et al. 2014) dan secara matematis terhubung oleh fungsi  $\sum_{i=1}^S P_i$  yang menjadi dasar perhitungan dari  $H'$  dan  $\lambda$ , sementara  $J'$  diturunkan dari  $H'$ . Sebagaimana diungkapkan para ahli bahwa keanekaragaman adalah kombinasi jumlah dan pemerataan spesies (Heip 1974; Jost 2010; Pielou 1966; Soegianto 1994).

Proses perhitungan dan analisis ekologi kuantitatif untuk lamun dan makroinvertebrata dikerjakan dengan bantuan perangkat lunak Microsoft®

Excel for Mac Versi 16.17 © 2018 Microsoft dan PAST for Mac Versi 3.22 ©

December 2018 <http://folk.uio.no/ohammer/past> (Hammer and Harper 2006; Hammer, Harper, and Ryan 2001).

#### 4.4.5 Analisis Data Parameter Fisik Kimia Perairan

##### a. TSS

Kadar TSS ditentukan berdasarkan penambahan berat kertas saring per volume sampel air tersaring. TSS dihitung berdasarkan SNI 06-6989.3-2004



cara uji padatan tersuspensi total secara gravimetri (Badan Standardisasi Nasional 2004).

$$\text{TSS (mg/l)} = ((A - B) \times 1000)/v \quad (19)$$

dimana :

A : Massa kertas saring akhir (mg)

B : Massa kertas saring awal (mg)

v : Volume sampel (ml)

b. Nitrat dan Fosfat

Nilai absorbansi pengukuran dari larutan blanko dan standar digunakan untuk membuat kurva kalibrasi dan memperoleh persamaan dan nilai koefisien regresi ( $R^2$ ) pengukuran. Selanjutnya nilai absorbansi sampel dimasukkan kedalam rumus regresi  $Y = (bx + a)$ .

c. Sedimen

Persentase (%) massa fraksi sedimen setiap fraksi ukuran partikel sedimen dihitung sebagai berikut

$$\% \text{ Massa } x = (\text{Massa Hasil Ayakan } x / \text{Massa awal}) \times 100\% \quad (20)$$

Sementara itu % berat kumulatif sedimen dihitung sebagai berikut.

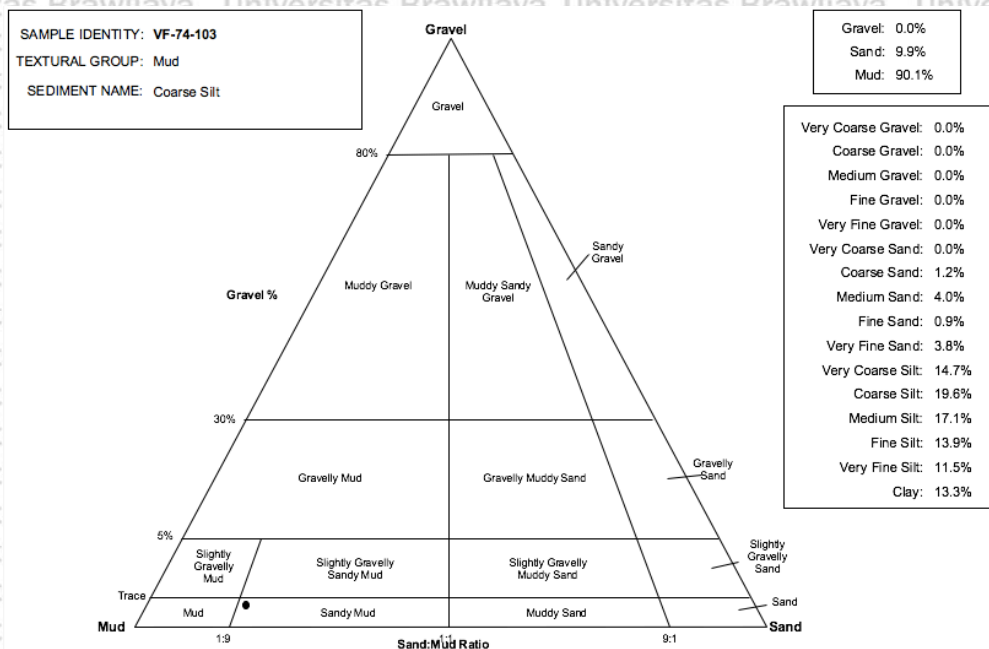
$$\% \text{ Kumulatif} = \% \text{ Massa } 1 + \% \text{ Massa } 2 + \dots \% \text{ Massa } n \quad (21)$$

Selanjutnya didapatkan sebaran massa berdasarkan ukuran butir dan kurva kumulatifnya.

Kalkulasi numerik sedimen dilakukan dengan bantuan dengan Microsoft® Excel for Mac Versi 16.17 © 2018 Microsoft dan GRADISTAT Versi 4 ©

Department of Geology Royal Holloway University of London (Blott and Pye 2001). Output analisis dengan perangkat lunak GRADISTAT antara lain jenis dan tekstur sedimen, plotting segitiga tekstur sedimen (gambar 19) sortasi ( $\sigma$ ), skewness/kemencengan ( $Sk$ ), dan kurtosis/keruncingan ( $K$ ) kurva distribusi sedimen (Blott and Pye 2001)





Gambar 19. Segitiga tekstur sedimen

Ringkasan seluruh variabel kajian beserta skala kategori untuk keperluan analisa beserta deksripsi ringkasnya disajikan pada tabel 10.

Tabel 10. Ikhtisar variabel analisis

	Variabel	Skala*	Kelas Interval	Deskripsi
Gelombang	Tinggi Gelombang (Douglass Scale)	1	0 - 10 cm	Calm (Rippled)
		2	10 - 50 cm	Smooth
		3	50 - 125 cm	Slight
		4	125 - 250 cm	Moderate
		5	250 - 400 cm	Rough
		6	400 - 600 cm	Very rough
		7	600 - 900 cm	High
		8	900 - 1400 cm	Very High
		9	> 1400 cm	Phenomenal
Lamun	Kerapatan (Tegakan m <sup>-1</sup> )	1	> 2000 cm	Sangat baik
		2	1000 - 2000	Baik
		3	500 - 1000	Sedang
		4	250 - 500	Kurang
		5	0 - 250	Sangat Kurang
Makrofit	% Tutupan	1	81-100	Sangat baik
		2	61-80	Baik
		3	41-60	Sedang
		4	21-40	Kurang
		5	0-20	Sangat Kurang
vertebrat	Komposisi jenis	1	8 - 12	Sangat baik
		2	4 - 7	Baik
		3	2 - 3	Sedang
		4	1	Kurang
		5	0	Sangat Kurang
Makrofit	Keanekaragaman (H')	1	0 - 0.99	Keanekaragaman rendah
		2	1 - 2.99	Keanekaragaman cukup



Sedimen	Keseragaman (E)	3	2 - 3.99	rendah
		4	3 - 4.99	Keanekaragaman sedang
		5	4 - 5.00	Keanekaragaman tinggi
		1	$0.75 < E \leq 1$	Keanekaragaman sangat tinggi
		2	$0.5 < E \leq 0.75$	Komunitas stabil
	Dominansi (C)	3	$0 < E \leq 0.5$	Komunitas labil
		1	$0 < C \leq 0.5$	Komunitas tertekan
		2	$0.5 < C < 0.75$	Tidak ada dominansi
	sorting ( $\sigma_a$ )	3	$0.75 < C \leq 1$	Dominansi sedang
		1	$< 0.35$	Dominansi tinggi
		2	$0.35 - 0.50$	<i>Very well sorted</i>
	Skewness (Sk)	3	$0.50 - 0.71$	<i>Well sorted</i>
		4	$0.71 - 1.00$	<i>Moderately well sorted</i>
		5	$1.00 - 2.00$	<i>Moderately sorted</i>
		6	$2.00 - 4.00$	<i>Poorly sorted</i>
		7	$> 4.00$	<i>Very poorly sorted</i>
Parameter Lingkungan	Kurtosis (Ka)	1	$< -1.30$	<i>Extremely poorly sorted</i>
		2	$-1.30 \text{ s/d } -0.43$	<i>Very fine skewed</i>
		3	$-0.43 \text{ s/d } 0.43$	<i>Fine skewed</i>
		4	$0.43 \text{ s/d } 1.30$	<i>Symmetrical</i>
		5	$> 1.30$	<i>Coarse skewed</i>
	Phosphate (mgL <sup>-1</sup> )	1	$< 1.70$	<i>Very coarse skewed</i>
		2	$1.70 - 2.55$	<i>Very platykurtic</i>
		3	$2.55 - 3.70$	<i>Platykurtic</i>
		4	$3.70 - 7.40$	<i>Mesokurtic</i>
	Nitrate (mgL <sup>-1</sup> )	5	$> 7.40$	<i>Leptokurtic</i>
		1	$< 0.002$	<i>Very leptokurtic</i>
		2	$0.002 - 0.004$	Oligotrophic
		3	$0.004 - 0.021$	Lower Mesotrophic
	Potensial Redoks (eH)	4	$> 0.021$	Higher Mesotrophic
		1	$< 0.0087$	Eutrophic
		2	$0.0087 - 0.0091$	Oligotrophic
		3	$0.0091 - 0.0018$	Lower Mesotrophic
	pH	4	$> 0.018$	Higher Mesotrophic
		1	$< 0$	Eutrophic
		2	$0 < eH < 200$	Reduksi
	Salinitas (ppt)	3	$\geq 200$	Transisi
		1	$\geq 8$	Oksidasi
		2	$7$	Alkali
	DO (mgL <sup>-1</sup> )	3	$6$	Netral
		1	$30 - 35$	Asam
		2	$18 - 30$	Euhaline
		3	$5 - 18$	Polyhaline
		4	$0.5 - 5$	Mesohaline

\*Skala variabel



Variabel yang dihasilkan selain secara langsung menjadi indikator status juga menjadi proksi pada tahapan analisa selanjutnya yang melibatkan variabel-variabel lain.

#### 4.4.6 Analisis Dinamika Musiman Variabel Fisik Kimia Perairan

Untuk mengetahui fluktuasi variabel fisik kimia perairan akibat dinamika antar musim, dilakukan analisis ANOVA (Analysis of Variance). Beda nyata rerata variabel antar musim merupakan indikator fluktuasi atau variabilitas musiman sementara ketiadaan perbedaan merupakan indikator stabilitas variabel.

Fluktuasi antar musim suatu variabel dianalisis berdasarkan pengaruh hidrodinamika perairan yang telah dihasilkan model. Selanjutnya interpretasi analisis mempertimbangkan berdasarkan pola dan pengaruh interaksi antar variabel dalam setiap musim.

#### 4.4.7 Analisis Dinamika Musiman Komunitas Lamun dan Makroinvertebrata

Setelah fluktuasi musiman faktor abiotik/lingkungan ekosistem diketahui, analisis data dilanjutkan untuk mengetahui karakteristik dan dinamika ekosistem lamun beserta komunitas penyusunnya secara spasial maupun temporal. Karakteristik dan hubungan antara variabel biotik dan abiotik ekosistem dianalisis dengan metode multivariat. Analisis multivariat merupakan metode pengolahan variabel dalam jumlah banyak yang bertujuan mencari pengaruh variabel-variabel tersebut terhadap suatu obyek secara simultan atau serentak.

Karakter dan dinamika spasio-temporal ekosistem padang lamun beserta makroinvertebrata asosiatifnya dikaji dengan pendekatan model ekologi numerik PERMANOVA (Permutational Multivariate Analysis of Variance), *Non metric Multidimensional Scale* (NMDS), dan *Canonical Correspondence Analysis* (CCA).



a. PERMANOVA (Permutational Multivariate Analysis of Variance)

Dinamika komunitas lamun dan makroinvertebrata antar musim dianalisis PERMANOVA (Anderson 2001, 2005, 2017). PERMANOVA merupakan metode partisi geometris variasi dari kumpulan (*cloud*) data multivariat yang didefinisikan secara eksplisit di ruang dari ukuran ketidaksamaan (*distance*) sebagai respon terhadap satu atau lebih faktor analisis varians (Anderson 2001, 2005, 2017). Analisis ini bertujuan untuk mengukur signifikansi perbedaan antara centroids dan dispersi data dari satu kelompok data (*cloud*) terhadap kelompok lainnya (Anderson 2001, 2005, 2017).

PERMANOVA merupakan model ekologi numerik untuk melihat dinamika keanekaragaman- $\beta$  ( $\beta$ -diversities) suatu kelompok unit sampling/stasiun terhadap kelompok lain maupun perbedaan antar musimnya. Analisis PERMANOVA untuk variasi centroids dan dispersi  $\beta$ -diversities vegetasi lamun dan makroinvertebrata dilaksanakan dengan bantuan perangkat lunak PAST V3.22 For Mac 2018 (Hammer and Harper 2006; Hammer et al. 2001).

b. NMDS (*Non metric Multidimensional Scale*)

NMDS merupakan teknik ordinasasi data dengan cara memvisualisasikan tingkat kesamaan kasus individual dari suatu dataset. Ordinasasi dalam ekologi digunakan untuk mendeskripsikan hubungan antara pola komposisi spesies dan gradien parameter lingkungan. NMDS merangkum data (dalam hal ini kelimpahan jenis; stasiun menurut spesies) melalui pengurangan dimensi non-linear untuk menghasilkan representasi grafis dimana spesies dan stasiun yang mirip diplot berdekatan/mengelompok sementara spesies dan stasiun yang berbeda diletakkan pada posisi terpisah (Greenacre and Primicerio 2013). Idealnya kedekatan spesies dan stasiun akan merepresentasikan dan dijelaskan oleh gradien parameter lingkungan.



Analisis NMDS dalam penelitian ini merupakan analisis komplementer terhadap analisis PERMANOVA. Tujuannya untuk menghasilkan visualisasi partisi geometrik matriks D dari centroid dan dispersi  $\beta$ -diversities unit-unit sampling pada ruang euclidean sebagaimana disarankan Anderson (2017).

c. CCA (*Canonical Correspondence Analysis*).

Setelah mengetahui dinamika antar musim komunitas lamun dan makroinvertebrata. Selanjutnya dilakukan analisa untuk menjelaskan sejauh mana keterkaitan antara komponen biotik (lamun dan makroinvertebrata) terhadap komponen abiotik (fisik dan kimia perairan) pada setiap musim.

Pendekatan model ekologi numerik yang digunakan untuk mengungkapkan respon komponen biotik terhadap dinamika musiman pada habitatnya adalah metode *canonical correspondence analysis* (CCA) (Braak 2011; Ter Braak 1986; ter Braak and Verdonschot 1995).

Metode CCA pertama kali diperkenalkan dalam kajian ekologi oleh ter Braak (1986). CCA merupakan metode analisis multivariat yang bertujuan untuk menjelaskan hubungan komposisi suatu komunitas dengan kondisi lingkungannya (Braak 2011; Ter Braak 1986; ter Braak and Verdonschot 1995; Legendre 2018a; Legendre and Legendre 2012). *Canonical Analysis* merupakan bentuk analisis simultan dari dua atau lebih tabel data. Analisis Kanonik memungkinkan peneliti ekologi untuk melakukan perbandingan langsung dari dua matriks data (*direct gradient analysis*) (Legendre 2018b; Legendre and Legendre 2003, 2012).

Metode ini dirancang untuk mengekstrak *synthetic environmental gradients* dari sekumpulan data (cloud) ekologis dimana taksa tertentu (dependent variabel) menempati posisi tertentu dalam plot yang berkorespondensi dengan gradient lingkungan (independent variabel) dalam skala eigen (baik

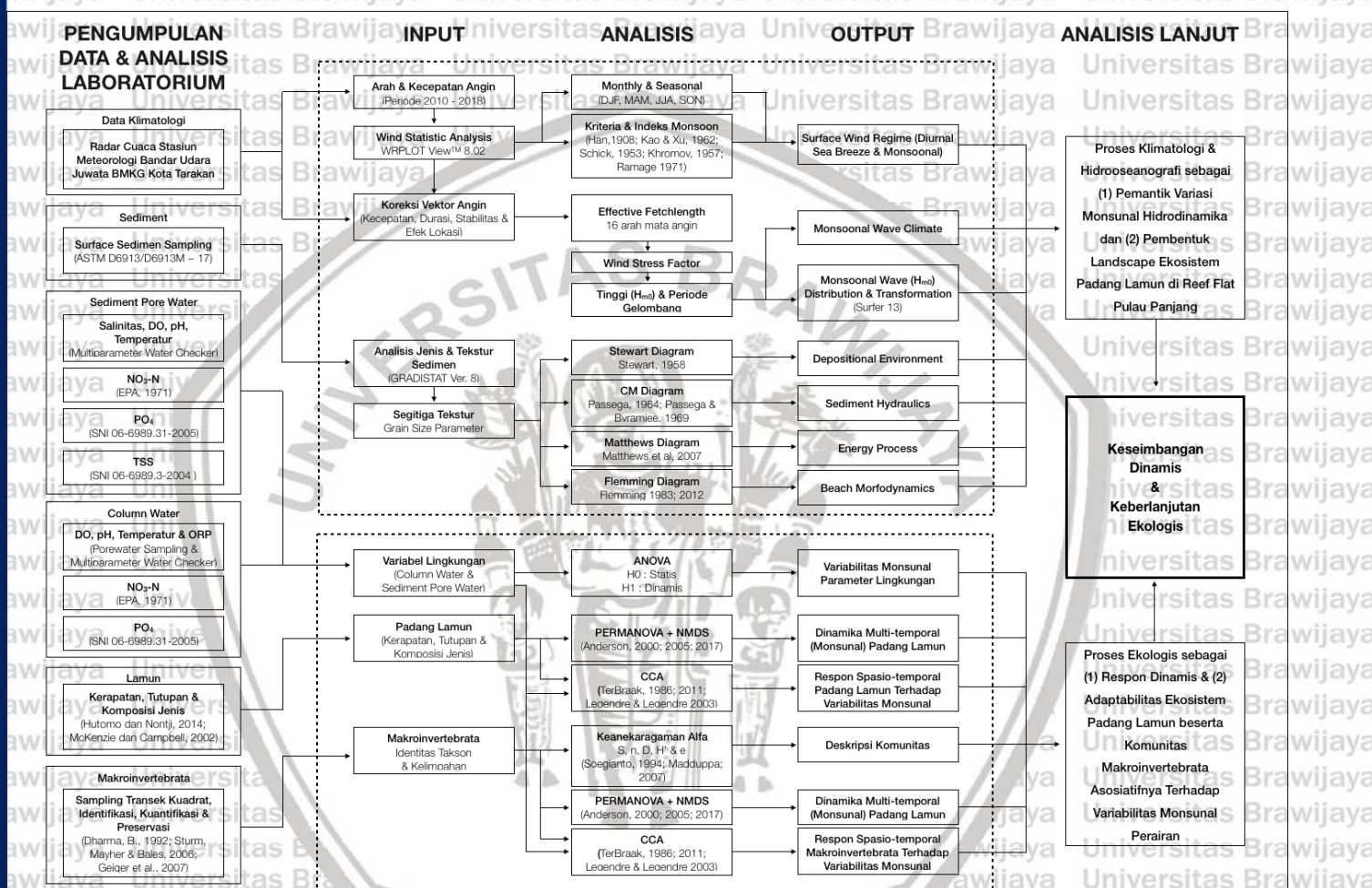


eigenvalue maupun eigenvector). Dalam hal ini posisi relatif suatu taksa pada plot merupakan responnya terhadap sekumpulan variabel lingkungan.

Pengolahan data dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Microsoft® Excel sebagai platform input dan pengolahan data dasar untuk selanjutnya ditransformasikan sesuai requirement perangkat lunak yang spesifik untuk pengolahan data lanjut. Analisis ANOVA dengan program SPSS 25 IBM V25 2018 for Mac. Sementara analisis numerik ekologi dengan menggunakan program Paleontological Statistic PAST 3.22 2018 for Mac (Hammer and Harper 2006; Hammer et al. 2001).







Gambar 20. Kerangka analisis penelitian



## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

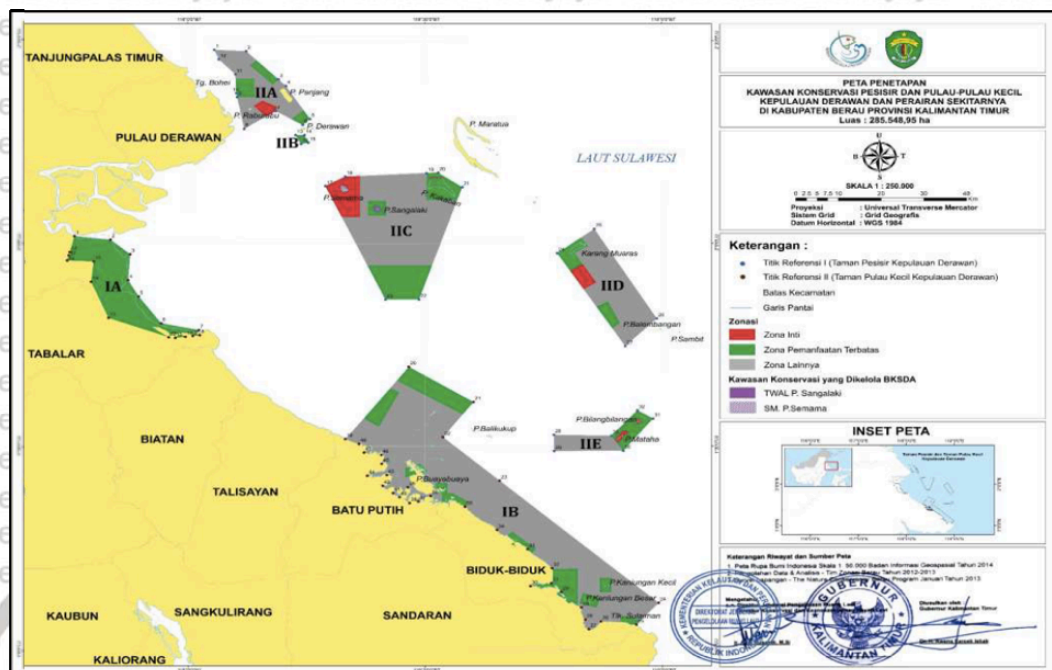
#### 5.1 Gambaran Umum Pulau Panjang dan Kepulauan Derawan

Secara geografis Pulau Panjang terletak pada posisi  $118^{\circ}11'37.99''$  -  $118^{\circ}13'20.05''$  BT dan  $2^{\circ}20'52.97''$  -  $2^{\circ}23'03.94''$  LU. Pulau Panjang merupakan bagian dari Kepulauan Derawan yang termasuk dalam wilayah administrasi Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur yang berbatasan dengan Provinsi Kalimantan Utara. Pulau ini berjarak 15 km arah timur Tanjung Batu di Daratan Utama Pulau Kalimantan, 5 km arah utara dari Pulau Derawan dan 110 km sebelah selatan dari Pulau Tarakan.

Berada di pesisir timur laut Daratan Kalimantan dan bagian barat dari Laut Sulawesi, Pulau Panjang merupakan bagian dari Sulu Sulawesi Marine Ecoregion (SSME) yang dikenal sebagai salah satu episentrum/hotspot dari keanekaragaman hayati perairan dangkal tropis global (Spalding et al. 2007, 2012). Mengingat tingginya keanekaragaman hayati kawasan ini maka pemerintah Republik Indonesia menginisiasi upaya konservasi dan preservasi habitat melalui Keputusan Menteri Pertanian nomor 604/Kpts/Um/8/1982 yang menetapkan Pulau Semama beserta perairannya Seluas 220 Ha sebagai Suaka Margasatwa dan Pulau Sangalaki beserta Perairannya Seluas 280 Ha sebagai Taman Wisata Alam Laut. Seiring berkembangnya kewenangan daerah dalam bingkai otonomi di era reformasi, pemerintah daerah menambah luas areal konservasi perairan di Kepulauan Derawan melalui Peraturan Bupati Berau No. 31 tahun 2005 tentang Kawasan Konservasi Laut Berau. Selanjutnya berdasarkan Undang Undang Nomor 27 Tahun 2007 jo. Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil, Pemerintah Kabupaten Berau mengeluarkan Peraturan Daerah No. 8 Tahun



## 2014 tentang Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (RZWP3K) Kabupaten Berau.



Gambar 21. Peta Kawasan Konservasi Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil Kepulauan Derawan Dan Perairan Sekitarnya Di Kabupaten Berau Provinsi Kalimantan Timur sebagaimana dalam Lampiran II: Keputusan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia Nomor 87/Kepmen-Kp/2016

Hingga pada 2016, Kawasan Konservasi Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil Kepulauan Derawan dan Perairan Sekitarnya di Kabupaten Berau Provinsi Kalimantan Timur disahkan melalui Keputusan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia nomor 87/KEPMEN-KP/2016. Dalam kedua huruf b nomor 1 Keputusan Menteri tersebut, Pulau panjang ditetapkan sebagai Taman Pulau Kecil IIA dengan luas 21.015,36 Ha yang terdiri dari 3 zona yakni Zona Inti, Zona Pemanfaatan Terbatas dan Zona Lainnya.

### 5.2 Geologi Regional & Geomorfologi

Secara geologis Pulau Panjang merupakan bagian dari Tarakan Basin (Cekungan Tarakan) dan terletak pada bagian selatan dari Sub-Basin Tarakan (van Gorsel 2018; Hidayati et al. 2011; Maryanto 2012; Suwarna and Hermanto



2007; Tossin and Kadir 1996; Wight, A.W.R., Hare, L.H., Reynolds 1993).

Tarakan basin terbagi menjadi 4 Sub-basin yaitu Sub-basin Tidung, Sub-basin Berau, Sub-basin Tarakan dan Sub-basin Muara yang masing-masing dibatasi oleh jalur tinggian-tinggian yang dibentuk karena adanya jalur zona sesar (Fault)

Maratua dan Mangkalihat (gambar 22). Sedimentasi pada Tarakan Basin telah terjadi sejak masa Eosen Tengah bersamaan dengan terjadinya pengangkatan (uplift) di Selat Makasar yang memisahkan Pulau Sulawesi dan Pulau Kalimantan dan terjadinya penurunan di Basin ini membentuk Laut Sulawesi saat ini (Hall 2013, 2017; Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan 2005)

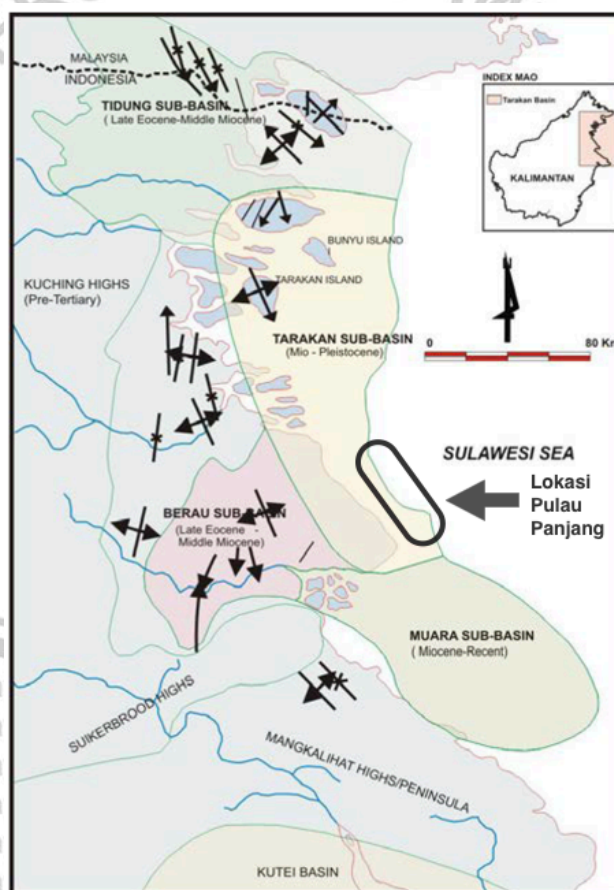
Struktur geologi Sub Basin Tarakan terdiri dari lipatan sesar normal (*Extention Fault*), sesar geser (*Lateral Fault*) dan kelurusan yang menunjukkan arah utama Barat Laut - Tenggara dan Barat Daya – Timur Laut. Struktur lipatan seperti antiklin dan sinklin berarah Barat Laut - Tenggara (NW – SE) dan Barat Daya – Timur Laut (Hall 2017; Hidayati et al. 2011; Kreemer, Holt, and Haines 2003; Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan 2005; Situmorang and Burhan 1995). Pada area ini Sesar Mendatar (*Strike-Slip Fault*) NW-SE bersifat sinistral atau blok di sisi lain dari sesar bergerak ke kiri (Hidayati et al. 2011). Sesar di Tarakan sub-basin dipercaya sebagai kelanjutan sistem Sesar Palu Koro dari Sulawesi (Hidayati et al. 2011). Pola demikian terbentuk berdasarkan sejarah tektonik yang telah terjadi empat kali di daerah ini (Situmorang and Burhan 1995).

Pulau Panjang merupakan bagian ujung utara dari kompleks *Berau Continental Shelf* (Dangkalan Benua Berau). Pulau Panjang ini terbentuk dari batuan terumbu (*Reef Limestone/Coralline*) berwarna putih hingga kelabu, dengan kristal kalsium karbonat berongga (Situmorang and Burhan 1995). Geomorfologi pulau seluas 442 Ha ini memanjang dari arah Barat Laut menuju Tenggara dan dibatasi oleh reef flat (dataran terumbu) dengan luas sekitar 6000



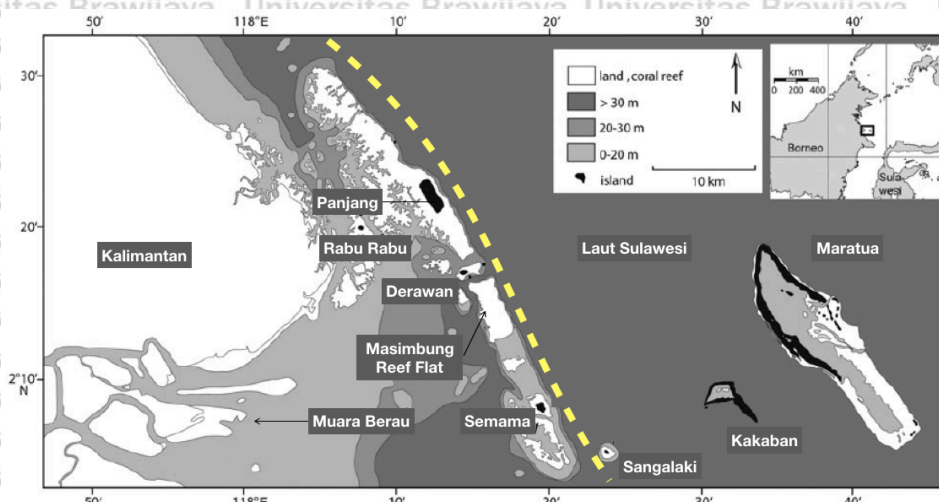
Ha, yang membentuk formasi *barrier reef system* (sistem terumbu karang penghalang) searah perpanjangan pulau dan sejajar garis pantai Pulau Kalimantan. *Barrier reef* ini nampak mengikuti pola kelurusan sesar Barat Daya – Tenggara (NW – SE) dengan susunan formasi Pulau Panjang, Pulau Derawan, Pulau Semama, dan Pulau Sangalaki.

Reef flat di *Berau Continental Shelf* memiliki karakteristik yang sangat datar, dengan profil kemiringan (slope) antara  $0.05^\circ$  hingga  $0.8^\circ$  (Christianen et al. 2013). Zona intertidal dan subtidal dari reef flat tersebut ditumbuhi oleh padang lamun sementara tepian luarnya ditumbuhi oleh terumbu karang tepi (van Katwijk, M. E W van der Welle, et al. 2011).



Gambar 22 Peta Geologi Tarakan Basin yang terdiri dari 4 Sub-Basin yaitu Tidung, Tarakan, Berau, Muara. Pulau panjang berada pada Bagian Selatan Sub-Basin Tarakan berbatasan dengan Bagian Utara Sub Basin Muara dimodifikasi dari Suwarna dan Hermanto (2007)





Gambar 23 Peta Kepulauan Derawan di Kabupaten Berau Provinsi Kalimantan Utara. Garis putus-putus kuning menunjukkan deretan pulau dan karang membentuk formasi terumbu karang penghalang (*Barrier Reef*) (dimodifikasi dari de Voogd (2009))

### 5.3 Karakteristik Tekstur Sedimen Pulau Panjang

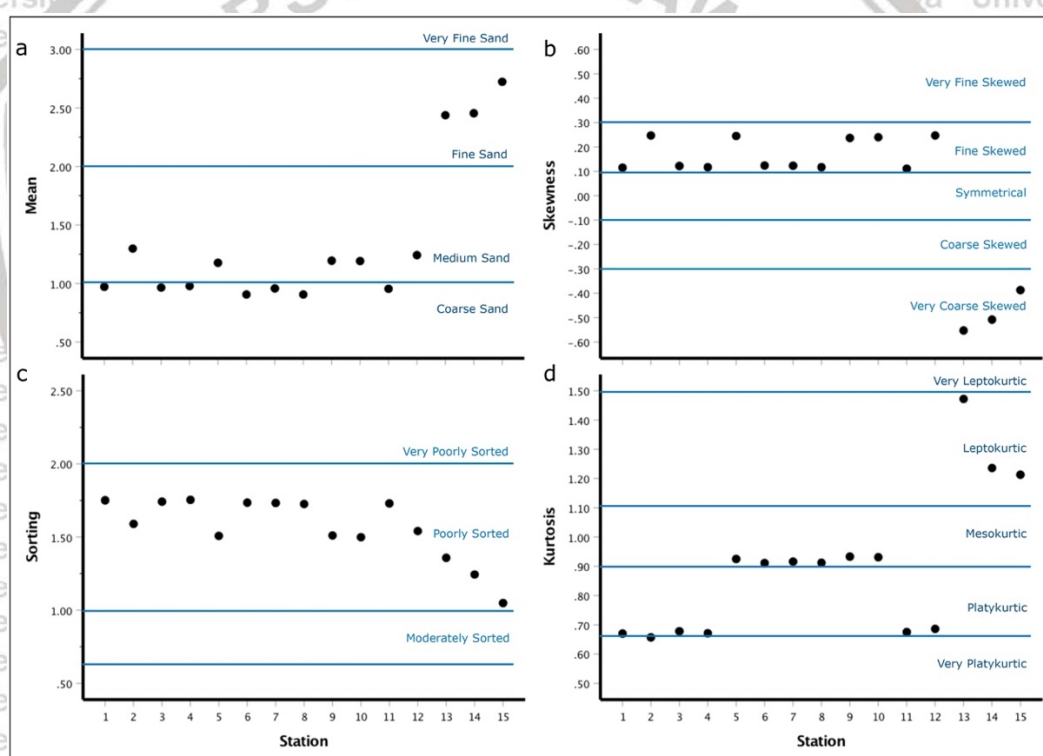
Hasil analisa parameter butir sedimen dari Pulau Panjang disajikan pada tabel 11.

Table 11. Parameter sedimen Pulau Panjang

Parameter Butir Sedimen Reef Flat Pulau Panjang									
Stasiun	Gravel (%)	Sand (%)	Mud (%)	Mean (φ)	Sortin (φ)	Skewnes (φ)	Kurtosis (φ)	D <sub>50</sub> (μm)	D <sub>90</sub> (μm)
1	17.4	82.5	0.1	0.972	1.751	0.115	0.670	548.5	2146.2
2	14.4	85.5	0.1	1.298	1.590	0.247	0.657	535.5	2103.0
3	16.6	83.4	0.0	0.965	1.742	0.122	0.678	554.4	2135.8
4	17.2	82.7	0.2	0.978	1.754	0.117	0.671	547.8	2143.0
5	15.1	84.8	0.0	1.177	1.508	0.245	0.925	563.1	2115.3
6	21.2	78.7	0.1	0.906	1.735	0.124	0.911	572.8	2182.9
7	16.0	83.9	0.1	0.958	1.733	0.123	0.916	557.0	2128.1
8	20.4	79.6	0.0	0.906	1.726	0.117	0.912	568.1	2175.7
9	13.8	86.2	0.1	1.195	1.511	0.237	0.933	552.1	2092.8
10	12.4	87.6	0.1	1.192	1.499	0.240	0.931	553.9	2064.1
11	16.4	83.5	0.1	0.955	1.730	0.111	0.675	549.5	2133.6
12	12.6	87.4	0.1	1.242	1.541	0.247	0.686	544.6	2068.9
13	5.4	94.5	0.1	2.438	1.358	-0.553	1.472	138.9	1053.2
14	4.8	95.1	0.1	2.455	1.244	-0.508	1.236	137.9	1028.7
15	2.6	97.2	0.2	2.724	1.049	-0.387	1.213	136.6	574.2



Sedimen pulau panjang memiliki tekstur antara pasir halus hingga pasir kasar. Sedimen pulau panjang termasuk dalam kategori biogenik/bioklastik yang dicirikan tingginya komposisi material yang berasal dari organisme pembentuk cangkang dan karang. Material sedimen merupakan hasil pelapukan fragmen karang dan sisa cangkang akibat proses hidrodinamis. Kondisi ini menunjukkan bahwa sedimen bersumber dari material setempat yang tidak bercampur dengan sedimen dari daratan. Temuan ini serupa dengan laporan (Solihuddin et al. 2019) dimana karang dan organisme pembentuk cangkang lainnya merupakan kontributor utama dari endapan karbonat pada pulau-pulau karang di Kepulauan Karimunjawa.

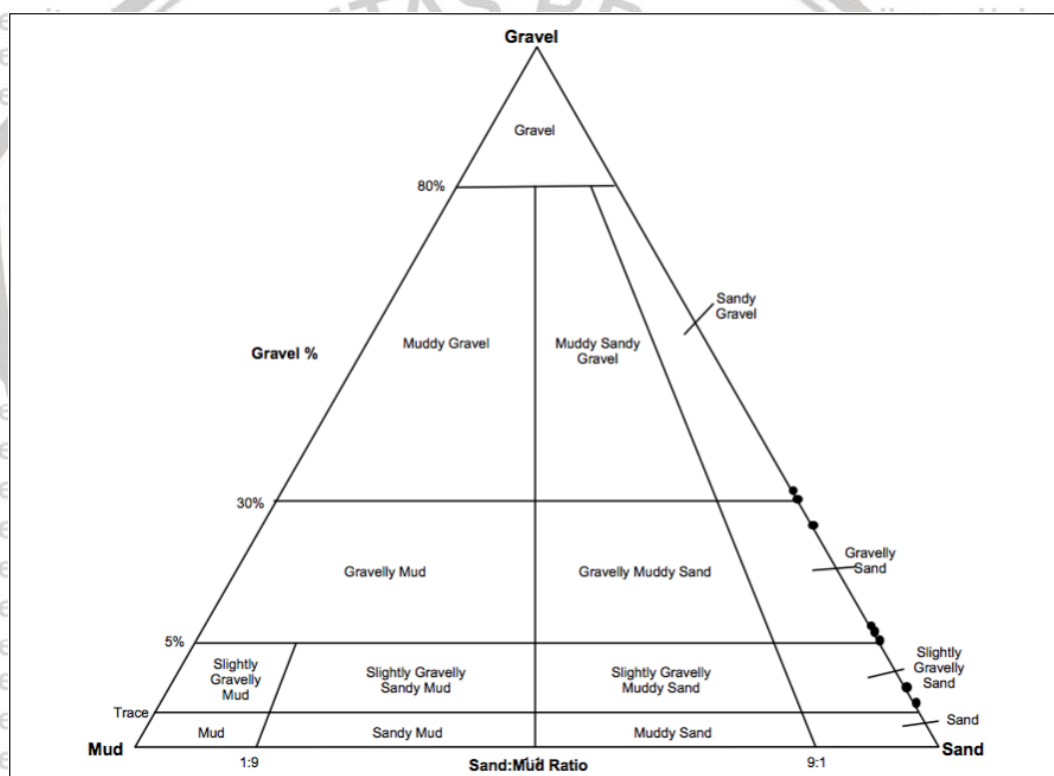


Gambar 24. Parameter tekstural sedimen permukaan reef flat Pulau Panjang (a) mean, (b) skewness, (c) sorting and (d) kurtosis, dalam satuan  $\phi$  (phi) beserta klasifikasi kategori deskriptifnya.

Tabel 11 dan gambar 24a menunjukkan rerata (mean) ukuran butir sedimen Pulau Panjang 1.36  $\phi$ , dengan kisaran antara 0.91  $\phi$  (maks) hingga 2.73  $\phi$  (min). Sampel didominasi oleh pasir kasar dan pasir sedang (stasiun 1 - 12),



sementara pada 3 stasiun selebihnya (stasiun 13 – 15) jatuh pada kategori pasir halus. Tabel 11 dan Gambar 24b menunjukkan kisaran nilai *skewness* antara -0.39  $\phi$  to 0.25  $\phi$ . Stasiun 1 – 12 dalam kategori *fine skewed* atau *positive skewness*, yang mengindikasikan kelebihan fraksi sedimen halus pada ekor kurva (Blott and Pye 2001; Folk and Ward 1957). Sebaliknya pada stasiun 13 – 15 *skewness* bernilai negatif. Sampel dari semua stasiun memiliki nilai sortasi berkisar dari 1.05  $\phi$  to 1.76  $\phi$  dan masuk dalam kategori sortasi yang buruk (*poorly sorted*). Nilai *kurtosis* bervariasi dari *very platykurtic* hingga *leptokurtic* (Tabel 11; Gambar 24c dan d).



Gambar 25. Segitiga tekstur (GSM) sedimen Pulau Panjang berdasarkan klasifikasi Blott & Pye (2012).

*Mean* atau rerata ukuran butir menggambarkan fungsi dari ukuran material sedimen yang tersedia sekaligus jumlah/besarnya energi hidrodinamik yang bekerja pada sedimen. Hal ini sepenuhnya bergantung pada kecepatan arus atau turbulensi dari medium pengangkut/transporter (Folk 1974). *Mean*



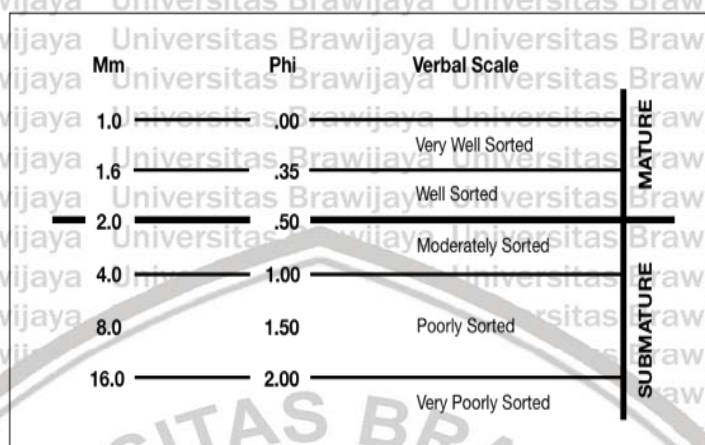
sampel sedimen dipengaruhi oleh sumber suplai sedimen, media pengangkut dan tingkat energi hidrodinamik pada lingkungan pengendapan sedimen (Folk and Ward 1957; Sahu. B. K. 1964). Lebih lanjut, ketidakseragaman nilai *mean* mengindikasikan adanya variasi pada kondisi hidrodinamika yang bekerja sepanjang dataran terumbu di Pulau panjang. Butiran sedimen yang lebih halus yang ditemukan pada stasun 13 – 15 menyiratkan kondisi arus dan gelombang yang lebih lemah dibanding stasiun 1 – 12 hal ini disinyalir karena daerah ini relatif terlindungi dari pengaruh laut lepas (Laut Sulawesi) oleh keberadaan Daratan Pulau Panjang.

Temuan ini mengkonfirmasi pernyataan Folk (1974), yang menyatakan bahwa terdapat kecenderungan sedimen menjadi lebih halus pada daerah yang dengan kondisi energi hidrodinamik yang lebih rendah. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa ukuran butir sedimen berkorelasi dengan *shear velocity*. Flemming (2000) mengidentifikasi sebuah hubungan antara ukuran butir tertentu dengan nilai kritis *shear velocity*. Nilai kritis *shear velocity* ini merupakan nilai energi (kecepatan arus atau turbulensi perairan) dimana suatu partikel dengan ukuran tertentu mulai tergerak dari kondisi diam sebagai respon dari adanya peningkatan gaya hidrodinamik yang bekerja pada dasar perairan (Simões 2014).

Folk (1974) mengusulkan teori kematangan tekstural sedimen, berdasarkan efek dari proses hidrodinamika pantai terhadap distribusi tekstur. Dimana nilai kematangan tekstur sedimen meningkat seiring meningkatnya dampak mekanis berupa pengikisan dan pemilahan yang diterima oleh sedimen oleh aksi arus dan gelombang. Dalam hal ini material sedimen melewati tingkatan secara sekuensial antara lain; *immature*, *submature*, *mature* dan *supermature* (Folk 1974). Folk (1974) juga memberikan deskripsi mengenai tingkatan skala kematangan tekstural berdasarkan nilai sortasi yang mengindikasikan keefektifan lingkungan dalam memisahkan (*winning*) dan



memilah sedimen (gambar 26). Sampel sedimen dari Pulau Panjang berada dalam kategori Sortasi yang buruk (poorly sorting), dengan demikian diklasifikasikan dalam tekstur submature menurut kriteria Folk (1974).



Gambar 26. Hubungan antara tingkat kematangan tekstural dan klasifikasi tingkat sortasi, digambar kembali berdasarkan (Folk 1974).

Belakangan Garzanti (2017) menyangkal konsep kematangan tekstural sedimen dan mengajukan argumentasi bahwasanya kondisi sortasi sedimen yang buruk maupun baik terjadi secara seketika dalam proses deposisi atau pengendapan dan bergantung pada gaya yang dominan. Di perairan sedimen diaduk, tertransportasi, oleh kombinasi dari aksi gelombang dan arus. Sementara gaya gravitasi menariknya ke dasar untuk terdeposisi. Apabila gaya gravitasi dominan maka akan menghasilkan sedimen dengan pemilahan yang buruk karena partikel dengan beragam ukuran terendapkan pada daerah yang sama. Sedangkan apabila ada arus yang bekerja maka terjadi pemilahan ukuran sedimen dimana partikel terendapkan berdasarkan kecepatan jatuh oleh gaya gravitasi. Akibatnya ada perbedaan kecepatan jatuh antar kelompok ukuran butir sedimen yang menyebabkan pemilahan searah dengan arus yang mentransportasikan partikel sedimen.



Dengan demikian, nilai sortasi sedimen tidak memiliki hubungan signifikan dengan akumulasi energi yang diterima oleh sedimen selama waktu tertentu, dan sedimen tidak melalui tingkatan-tingkatan tertentu secara sekuensial menuju kematangan tekstural (Garzanti 2017). Terlepas dari perdebatan teoritis tersebut, pada kasus sedimen Pulau Panjang ini, secara fundamental kedua teori tampak sepakat bahwa gelombang, arus, dan gaya gravitasi secara berkesinambungan memilah dan mengolah sedimen permukaan pada rata-rata terumbu seiring dinamika pasang dan surut perairan. Karenanya, nilai sortasi sampel secara langsung mencerminkan fluktuasi bersih dari energi hidrodinamik yang bekerja di Dataran Terumbu Pulau Panjang.

Dari aspek bentuk partikel, sedimen dengan nilai sortasi yang buruk (*poorly sorted*) menunjukkan mayoritas sedimen memiliki bentuk yang tidak beraturan. Hal ini dikarenakan material sedimen berasal dari karang dan sisa-sisa cangkang yang mengalami pelapukan. Temuan ini sejalan dengan laporan Flemming (2016) yang menyatakan bahwa pada kondisi hidrodinamika perairan yang seragam, butiran sedimen dengan bentuk yang bulat dan seragam cenderung mencapai nilai sortasi yang lebih baik dibandingkan dengan sedimen yang memiliki bentuk tidak teratur. Dengan demikian nilai sortasi yang lebih baik menunjukkan keseragaman dan keteraturan bentuk partikel sedimen.

#### 5.4 Karakteristik Klimatologi Pulau Panjang

Interaksi daratan, lautan dan atmosfer merupakan pemantik variabilitas klimatologi dan oseanografi. Menurut Wyrтки (1961b), posisi geografis kepulauan tropis Indonesia diantara benua Asia dan Australia menempatkannya sebagai wilayah monsoon yang ideal. Selanjutnya Ramage (Ramage 1968, 1971) menjelaskan signifikansi peran gugusan kepulauan Indonesia yang kemudian dipopulerkan sebagai "*Maritime Continent*" dalam sirkulasi atmosfer global.

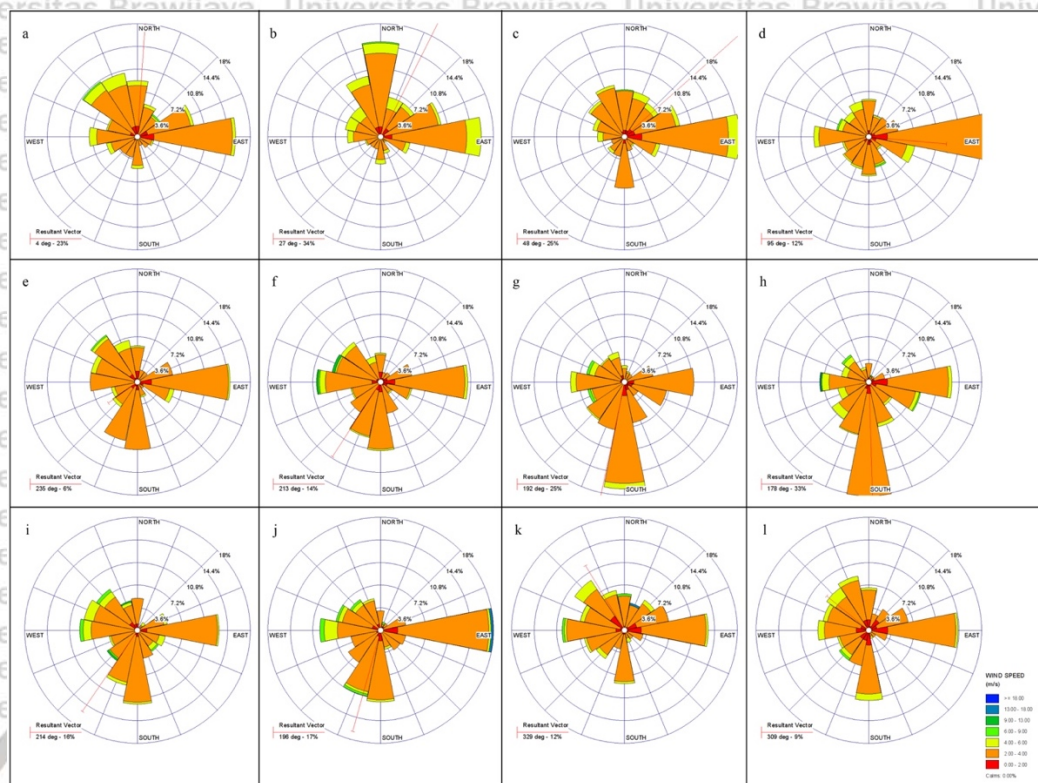


Interaksi antara daratan dan lautan berlangsung pada skala ruang dan waktu yang bertingkat. Angin dihasilkan oleh perbedaan tekanan dan suhu di atmosfer akibat distribusi energi radiasi matahari, tutupan awan serta dinamika disekitarnya (Aldrian 2008). Sirkulasi angin tersebut terjadi pada skala lokal, regional dan antar benua. Salah satu siklus angin skala benua yang mempengaruhi pola angin di Indonesia adalah Angin *Monsoon/Monsoon*. Angin monsun adalah angin yang berbalik arah secara periodik, yang disebabkan oleh perbedaan sifat termal antara benua dan lautan (Aldrian 2008; Ramage 1971; Tjasyono 2012; Wang 2006; Webster 2005). Indonesia dipengaruhi oleh *Asian Monsoon* dan *Australian Monsoon*. Wyrski (1961b) menyatakan bahwa Monsun Utara (*Asian Monsoon*) terbentuk penuh pada bulan Januari, sedangkan Monsun Selatan (*Australian Monsoon*) mencapai puncaknya antara Juli hingga Agustus.

Sirkulasi angin di atmosfer mempengaruhi pergerakan arus laut hingga kedalaman sekitar 200 m (Aldrian 2008). Dengan demikian pemahaman terhadap pola sirkulasi angin akan sangat bermanfaat dalam berbagai sub kajian kelautan dan perikanan misalnya; dinamika ekosistem laut, dinamika sumberdaya hayati, desain operasi penangkapan ikan, rekayasa pantai dan lepas pantai, kerentanan pesisir dan pulau-pulau kecil juga aspek sosial ekonomi pesisir yang terdampak akibat musim angin dan gelombang ekstrim. Dalam penelitian ini pemodelan pola distribusi arah dan kecepatan angin bulanan dan musiman bertujuan untuk menemukan variabilitas temporal angin yang dikaitkan periode *Asian Monsoon* dan *Australian Monsoon* di pesisir timur laut Kalimantan dan secara spesifik membuat model *wave climate* di sekitar Pulau Panjang.

Arah dan kecepatan angin bulanan diplotkan pada diagram rose dengan pembagian 16 arah mata angin. Garis resultan vektor menunjukkan rerata arah dan kecepatan angin untuk setiap bulan selama 2011-2018 (Gambar 27).





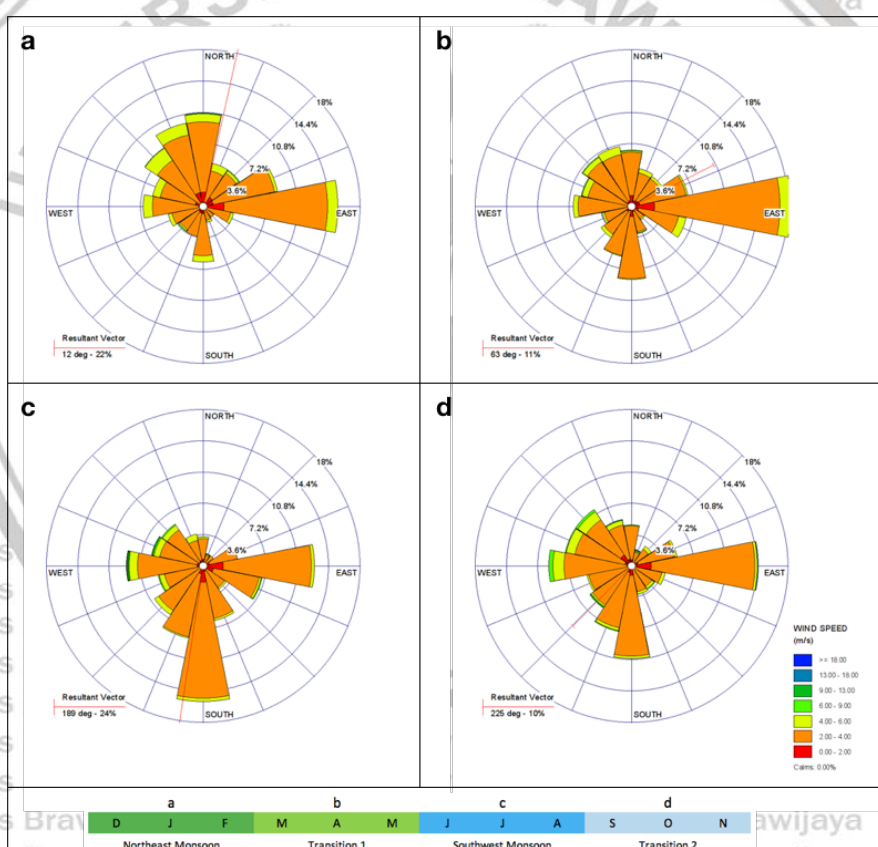
Gambar 27. Windrose (Mawar Angin) bulanan dari wilayah yang dikaji notasi huruf berurut secara alfabetis menunjukkan urutan bulan Kalender Gregorian (Januari - Desember)

Pola angin bulanan (Gambar 27) menunjukkan bahwasanya terdapat pergeseran arah *prevailing wind* setiap bulan. Pada bulan Januari hingga Maret angin dominan berhembus dari N-NE dengan resultant berkisar antara 22 – 35%. Pada April hingga Juni angin sangat bervariasi dengan resultant arah angin berkisar 6 – 14%. Juli dan Agustus angin dominan berasal dari Selatan dengan resultan sebesar 25 – 33%. September hingga Desember arah angin kembali bervariasi antara SW – NW dengan resultante arah angin yang tidak melebihi 17%.



### 5.4.1 Variabilitas Pola Angin Musiman

Untuk mengetahui pola angin musiman terkait pengaruh siklus monsunial, analisis windrose dilakukan dengan pengumpulan data angin dari bulan yang semusim (Gambar 28). DJF (Desember, Januari, Februari) merupakan periode dimana *Asian Monsoon* aktif, MAM (Maret, April, Mei) Transisi I, JJA (Juni, Juli, Agustus) periode *Australian Monsoon* aktif dan SON (September, Oktober, Nopember) untuk Transisi II. Transisi I merupakan periode antara berakhirnya *Asian Monsoon* sampai dengan dimulainya *Australian Monsoon*, Sementara itu Transisi II memisahkan antara akhir *Australian Monsoon* sampai dengan datangnya *Asian Monsoon* berikutnya.



Gambar 28. Windrose musiman (a) DJF bulan Desember, Januari, Februari mewakili periode aktif *Asian Winter Monsoon*; (b) MAM bulan Maret, April, Mei mewakili periode Transisi 1; (c) JJA bulan Juni, Juli, Agustus mewakili periode *Australian Summer Monsoon*, and (d) SON bulan September, Oktober, Nopember, mewakili periode Transisi 2.



Gambar 28 menunjukkan bahwa pada periode DJF dimana *Asian Monsoon* aktif, angin dominan dari arah Utara Timur Laut (NNE) dengan resultan vektor 22%. Memasuki periode MAM yang merupakan Transisi I antara *Asian Monsoon* menuju *Australian Monsoon*, terlihat angin sangat bervariasi dengan resultan sebesar 11% dari arah Timur Timur Laut (ENE). Menurunnya resultan vektor menunjukkan adanya pergeseran pola angin pada musim Transisi I. Selanjutnya ketika *Australian Monsoon* aktif pada periode JJA, arah angin dominan berasal dari Selatan Barat Daya (SSW). Periode ini juga ditandai peningkatan frekuensi angin dari arah tersebut yang berkontribusi sebanyak 24% terhadap jumlah total angin yang terekam. Sedangkan pada musim Transisi II (periode SON) angin kembali bervariasi arahnya.

Dari Pola angin bulanan (Gambar 2) dan musiman (Gambar 3) terlihat adanya angin dari arah timur (Laut Sulawesi) yang berhembus secara konsisten sepanjang tahun. Angin ini merupakan *Diurnal Sea Breeze* atau angin laut harian yang berhembus sepanjang tahun. *Sea Breeze* berhembus akibat adanya perbedaan tekanan udara di atas Laut Sulawesi dan Daratan Kalimantan yang secara kontinyu memicu sirkulasi angin diantara keduanya. Konsistensi *diurnal sea breeze* yang berhembus sepanjang tahun di setiap musim merupakan indikasi bahwa angin tersebut merupakan pola dasar (*archetype*) pergerakan angin di sepanjang pesisir timur laut Kalimantan yang berbatasan langsung dengan Laut Sulawesi.

#### 5.4.2 Interferensi Angin Monsunal

Januari adalah periode puncak musim dingin di *Northern Hemisphere*/Belahan Bumi Utara (BBU) sementara pada saat yang sama *Southern Hemisphere*/Belahan Bumi Selatan (BBS) mengalami puncak musim Panas. Perbedaan suhu dan tekanan udara antara Benua Asia di sebelah utara dan Benua Australia di selatan memicu pergerakan angin melintasi khatulistiwa.



Pembalikan arah angin dominan yang berulang secara periodik ini membentuk siklus monsun di kedua benua serta *Maritime Continent* yang berada diantaranya yang merupakan lintasan sirkulasi atmosfer tersebut. Khromov (1957) mendefinisikan daerah monsoon merupakan daerah dimana angin dominan berbalik arah sekurang-kurangnya  $120^\circ$  antara bulan Januari dan Juli dengan nilai Indeks Monsoon sekurang-kurangnya 40. Selain Indeks Monsoon Khromov (1957), beberapa peneliti sebelumnya telah mengusulkan persamaan Indeks Monsoon diantaranya Hann (1908), Schick (1953) dan Kao et al. (1962).

Berdasarkan gambar 27 dan 28, terlihat bahwa arah angin utama pada bulan Januari dan Juli berbeda sebesar  $164^\circ$ . Dengan demikian pola angin di wilayah kajian memenuhi kriteria pembalikan angin dominan akibat pengaruh monsoon.

Tabel 12. Perbandingan persentase frekuensi distribusi angin antara Januari dan Juli menunjukkan indeks monsoon Khromov ( $I_{kh}$ ) berdasarkan frekuensi angin dominan dari arah yang berbeda sekurang-kurang  $120^\circ$ .

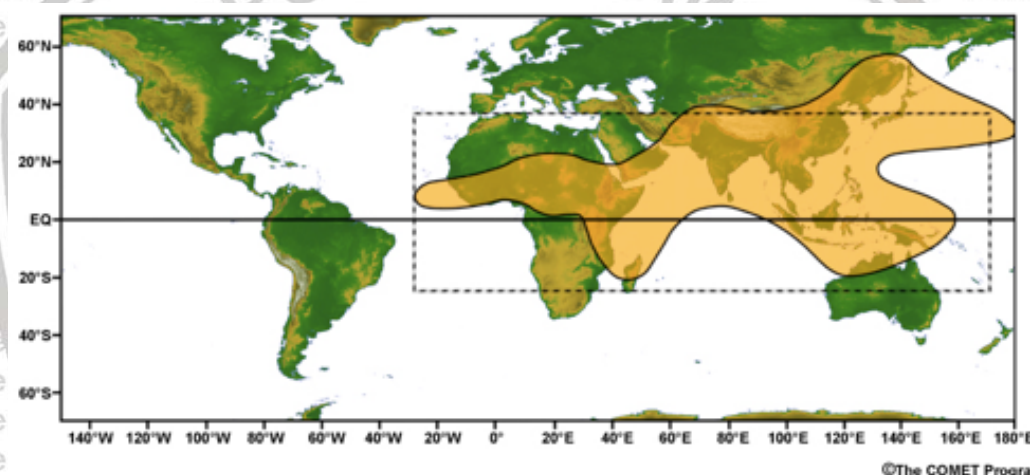
	Frequency (%)															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
January	8.9	5.29	4.32	9.13	15.62	2.65	2.16	1.44	5.05	3.36	3.36	5.05	7.7	5.05	10.58	10.34
July	2.65	1.77	1.54	4.63	11.04	6.84	2.65	6.62	17	7.73	7.29	5.96	8.6	6.18	4.64	4.86

$$I_{kh} = 21.98$$

Hasil perhitungan Indeks Monsoon (Tabel 12) menunjukkan bahwa wilayah kajian tidak memenuhi kriteria Khromov sebesar 40%. Meskipun demikian, seluruh wilayah Kepulauan Indonesia atau *Indonesia Maritim Continent* termasuk dalam delineasi kawasan Monsoon oleh Ramage (1971). Ramage (1971) menambahkan kriteria kekuatan angin (wind strength) pada Indeks Monsoon Khromov dan mengidentifikasi daerah-daerah yang meliputi Afrika, Asia, dan Australia sebagai daerah yang memenuhi kriteria angin yang berbalik arah dan kriteria hujan monsoon (gambar 29). Aldrian (2008) menyatakan bahwa belum ada definisi indeks monsun yang baku untuk wilayah Indonesia.



Penyebabnya yaitu adanya beberapa tipe monsun di benua maritim dan sifat lokal yang sangat mempengaruhi variabilitas iklim akibat efek orografis dan rupa bumi (Aldrian 2008). Variabilitas monsun di Kepulauan Indonesia sebagai respon baik saat *Asian Monsoon* dan *Australian Monsoon* aktif, menunjukkan karakter yang khas sehingga dinamakan "*Maritime Continent Monsoon*" (C. P. Chang et al. 2005; Chang et al. 2004; Chang, Wang, and Hendon 2006; C.-P. Chang, Wang, and Lau 2005; Robertson et al. 2011). Lebih lanjut variabilitas tersebut disebabkan oleh pengaruh *Madden-Julian Oscillation* (MJO), *Cold Surges*, dan sistem cuaca sinoptik lainnya (C. P. Chang et al. 2005; Chang et al. 2004, 2006; C.-P. Chang et al. 2005).



Gambar 29. Delineasi daerah pola iklim monsoonal kurva tertutup menunjukkan kawasan yang memenuhi kriteria Monsoonal Khromov sementara kotak persegi membatasi daerah Monsoon (Ramage 1971).

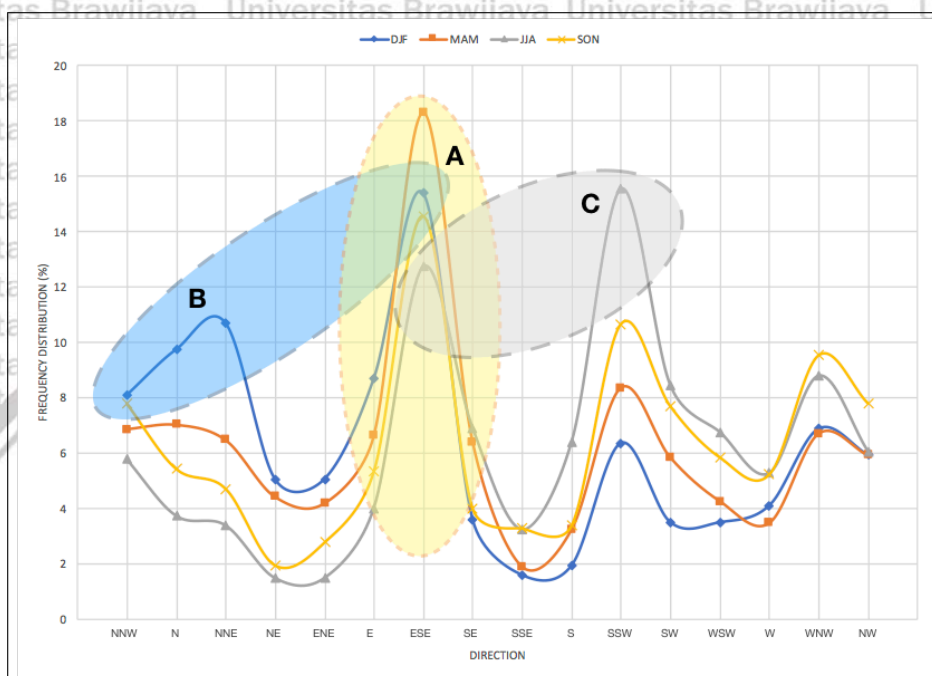
#### 5.4.3 Kompleksitas Pola Angin Lokal

Nilai indeks monsun wilayah kajian tidak memenuhi kriteria monsun diakibatkan oleh keberadaan *diurnal sea breeze* (Angin Laut Harian) yang berhembus dari Laut Sulawesi ke Daratan Kalimantan (Gambar 27 dan 28).

Interaksi darat-laut merupakan pola mendasar yang membangkitkan sirkulasi angin di pesisir. Hasil pemisahan menunjukkan bahwa angin laut merupakan



pola dasar angin di wilayah kajian akibat perbedaan tekanan antara Daratan Kalimantan dan Laut Sulawesi (Gambar 30). Sementara itu Angin Darat dari daratan Kalimantan berhembus dengan arah bervariasi yang disebabkan karena beragamnya topografi daratan yang membentuk karakter orografisnya.

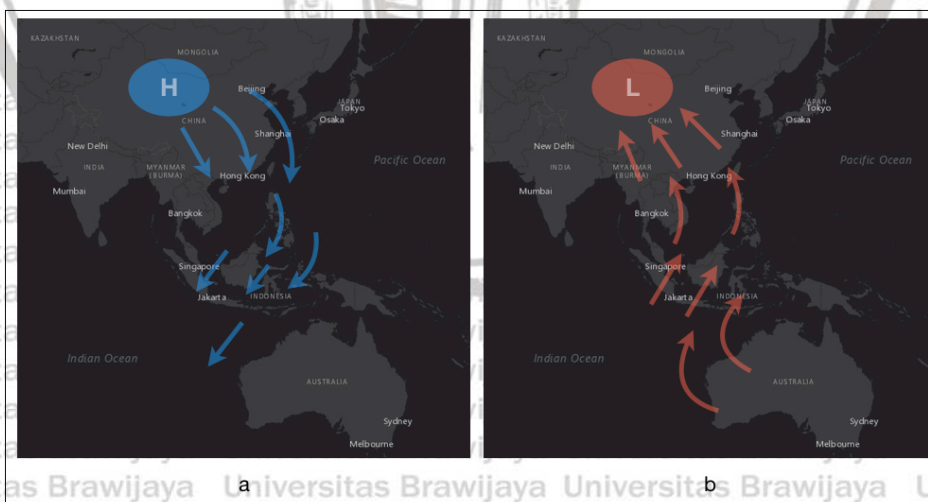


Gambar 30. Perbandingan persentase frekuensi distribusi arah angin pada periode DJF (garis biru diamond), MAM (garis kotak oranye), JJA (garis abu-abu segitiga), dan SON (garis kuning silang) tahun 2016-2018. Area elips berarsir menunjukkan dominasi *Sea Breeze* (A) dan interaksi antara *Sea Breeze* terhadap *Asian Monsoon* (B), dan *Australian Monsoon* (C).

Area elips berarsir A pada gambar 30 menunjukkan bahwa pada saat transisi (MAM dan SON) angin laut merupakan angin dominan (Area elips berarsir A). Memasuki Periode DJF ketika *Asian Winter Monsoon* aktif, frekuensi angin dari Barat Laut hingga Utara meningkat (Area elips berarsir B). Hal ini diikuti dengan sedikit kenaikan frekuensi Angin Laut dibanding periode sebelumnya (SON). Pada saat Transisi I (MAM) Angin Laut mencatatkan frekuensi tertinggi. Menariknya kedatangan angin *Australian Summer Monsoon* dari arah Selatan hingga Barat Daya pada periode JJA menurunkan frekuensi angin timur (Area elips berarsir C).



Angin dengan kecepatan yang lebih tinggi cenderung berasosiasi dengan angin monsunal baik pada periode monsoon asian (DJF) maupun *Australian Summer Monsoon* (JJA) (Gambar 28a dan c). Sedangkan kekuatan angin cenderung melemah pada Transisi I (MAM) dan Transisi II (SON). Pada periode DJF (Gambar 28a) terlihat indikasi pembelokan arah angin yang terjadi saat monsoon asia aktif, khususnya pada januari yang merupakan puncak *Asian Winter Monsoon* (Gambar 27a). *Asian Winter Monsoon* ditandai dengan angin Barat Laut Utara (NWN) bertemu dengan Angin Laut sehingga resultant vektornya berupa angin Utara Timur Laut (NNE). Sebaliknya saat *Australian Summer Monsoon* aktif di bulan Juli, angin dominan Selatan Barat Daya (SSW) bertemu dengan dengan Angin Laut menghasilkan resultant vektor Angin Selatan (S) (Gambar 28c). Hal ini selaras dengan temuan beberapa penelitian sebelumnya (C. P. Chang et al. 2005; Dambul 2005, 2010; Dambul and Jones 2007) yang menyatakan bahwa rerata angin di wilayah timur laut Pulau Kalimantan pada bulan januari cenderung dari arah Utara Timur Laut/*North North East* (NNE) dan Selatan Barat Daya/*South South West* (SSW) pada bulan Juli.



Gambar 31. Pola pergerakan angin (a) *Asian Winter Monsoon*, ketika angin mendekati khatulistiwa terjadi pembelokan sehingga arahnya dari Barat Laut hingga Timur Laut, (b) *Australian Summer Monsoon*, ketika angin mendekati khatulistiwa terjadi pembelokan sehingga arahnya dari Selatan hingga Barat Daya.



Pertukaran angin antara monsun menyebabkan Benua Maritim Indonesia mengalami pergiliran musim kemarau dan musim hujan. *Asian Winter Monsoon* identik dengan musim hujan, badai dan banjir, sementara *Australian Summer Monsoon* identik dengan kemarau dan kebakaran hutan di Sumatera dan Kalimantan. Meskipun demikian Distribusi musim hujan di Benua Maritim Indonesia tidak memiliki pola yang seragam (Aldrian 2001; Aldrian et al. 2007; Chang et al. 2004; Hamada et al. 2002). Hal tersebut dikarenakan distribusi daratan dan laut serta kompleksitas interaksi antara keduanya dan unsur-unsur meteorologi lainnya menyebabkan variabilitas klimatologis yang tinggi antar wilayah di Benua Maritim Indonesia.

Berdasarkan analisis statistik vektor angin dapat ditarik kesimpulan bahwasanya pola lokal angin di Timur Laut Kalimantan bersifat kompleks. Kompleksitas pola angin disebabkan perpaduan antara pola dasar (*Archetype*) dan pola *monsoonal*. Pola dasar pergerakan angin dicirikan oleh sirkulasi *Diurnal Sea Breeze* (Angin Laut Harian) sebagai akibat interaksi Laut Sulawesi dan daratan Pulau Kalimantan. Pola dasar ini mendapatkan pengaruh dari siklus pembalikan angin monsun sehingga membentuk Monsun Timur Laut (*North East Monsoon*) pada periode *Asian Winter Monsoon* (Desember, Januari, Februari). Sebaliknya ketika *Australian Summer Monsoon* aktif (Juni, Juli, Agustus) angin dominan membentuk Monsun Barat Daya (*South West Monsoon*).

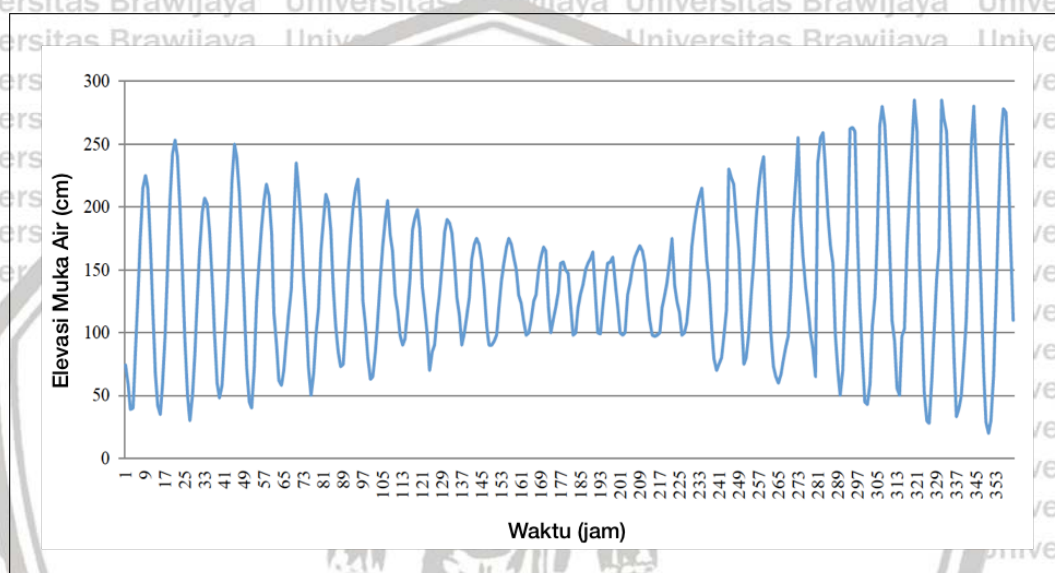
## 5.5 Karakteristik Hidro-Oseanografi Pulau Panjang

### 5.5.1 Pasang Surut dan Arus Pasang Surut

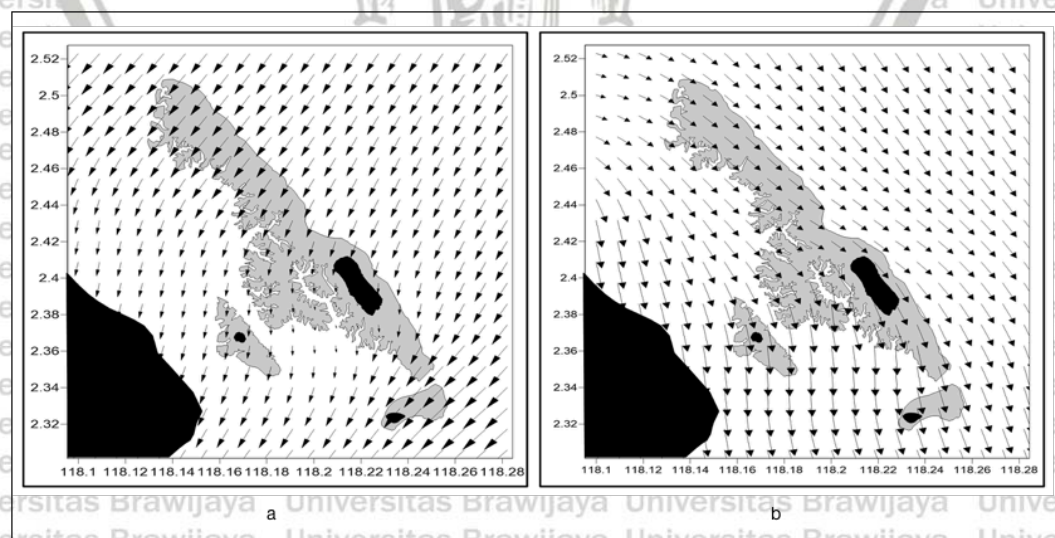
Kondisi oseanografi dari Pulau Panjang terpengaruh secara langsung oleh Laut Sulawesi (Atmadipoera and Mubaraq 2016; Roem et al. 2016; Tarya 2018; Tarya et al. 2010, 2015). Fitur hidrodinamika sirkulasi perairan yang bekerja pada *Berau Continental Shelf* dipicu oleh pasang surut, angin dan



perbedaan densitas (Tarya et al. 2010). Pasang surut di Pulau Panjang memiliki pola *mixed predominantly semidiurnal*/campuran cenderung harian ganda (Atmadipoera and Mubaraq 2016; Roem et al. 2016; Tarya 2018; Tarya et al. 2010, 2015). Kisaran amplitudo pasang surut mencapai 1 m pada saat *neap tide* dan 2.5 m saat *spring tide* (Atmadipoera and Mubaraq 2016; Buschman et al. 2010, 2012; Roem et al. 2016; Tarya 2018; Tarya et al. 2010, 2015)



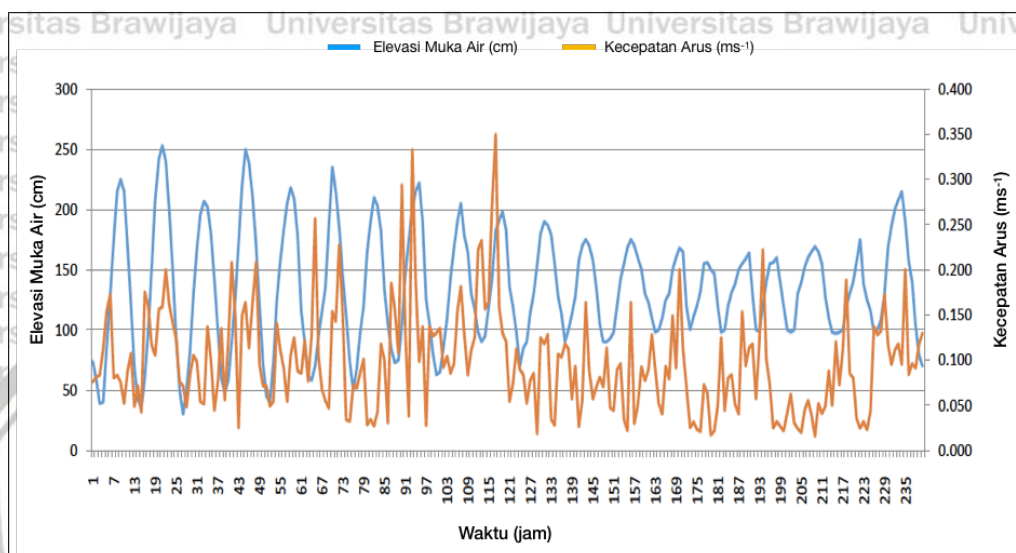
Gambar 32. Grafik pasang surut di Kepulauan Derawan selama 15 piantan (1 piantan = 25 jam pengamatan) (Roem et al. 2016)



Gambar 33. Peta Arus Pasang Surut di Sekitar Pulau (a) vektor arus menuju kondisi pasang (a) vektor arus menuju surut



Pasang surut di *Berau Continental Shelf* memiliki pola rambatan melintasi dataran terumbu (reef flat) pada barrier reef. Pola ini menyebabkan peningkatan amplitudo pasang akibat efek pendangkalan (*shoaling effect*) di tepi terumbu yang segera diikuti dengan penurunan amplitudo akibat gaya friksi dasar laut (Tarya et al. 2010). Hal ini terjadi di sepanjang reef flat Pulau Panjang.



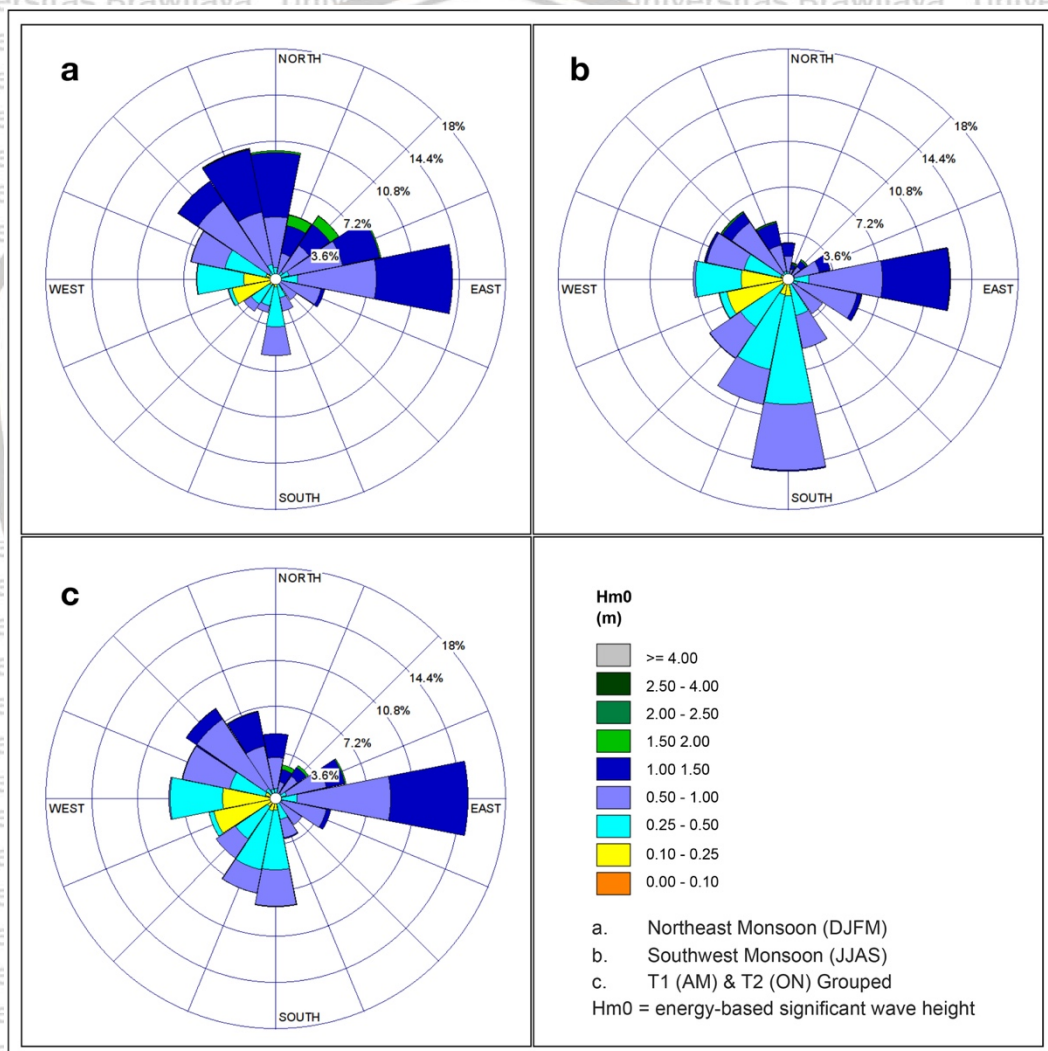
Gambar 34. Grafik hubungan antara Pasang surut dan Arus Pasang Surut di Kepulauan Derawan (Roem et al. 2016)

Kecepatan arus pasang surut di wilayah penelitian berubah-ubah secara periodik mengikuti fase pasang surut (Roem et al. 2016). Arus pasang surut merupakan tipe arus yang dominan dalam proses sirkulasi air laut di perairan dangkal seperti teluk, selat, maupun pulau-pulau kecil. Arus pasang surut mentransportkan massa air dari laut dalam menuju perairan yang lebih dangkal di sekitar pantai. Sebaliknya pada saat surut massa air tertransportasi dari perairan pantai ke laut dalam. Keberadaan Pulau panjang mempengaruhi arus pasang surut dan gelombang disekitarnya. Ketika massa air menuju pasang atau pun surut memasuki daerah reef flat (dangkalan terumbu) di bagian luar dari Pulau Panjang maka massa air yang bergerak akan mengalami transformasi baik arah dan kecepatannya.



### 5.5.2 Monsoonal Wave Climate

*Wave Climate* didefinisikan sebagai rerata distribusi dari tinggi, periode dan arah dari gelombang pada suatu lokasi dalam jangka waktu tertentu. *Wave climate* Pulau Panjang diperoleh dengan mentransformasikan data arah dan kecepatan angin dan *fetch* untuk mendapatkan model gelombang terbangkit angin. *Waverose* (Mawar Gelombang) memberikan gambaran distribusi tinggi gelombang signifikan ( $H_{m0}$ ) di perairan Pulau Panjang dari 16 arah mata angin.



Gambar 35. Waverose (Mawar Gelombang) musiman dari perairan Pulau Panjang (a) Monsun Timur Laut (b) Monsun Barat Daya dan (c) Periode transisi 1 dan 2 digabungkan menjadi 1.



Gambar 35 menunjukkan bahwa pada periode DJFM 63% gelombang berasal dari arah Barat Laut hingga Timur dengan tinggi gelombang 0.5 – 1.5 meter. Ombak tertinggi pada periode DJFM dapat mencapai 2 meter dari arah Utara Timur Laut (NNE) dan Timur Laut (NE). Pada periode ini angin monsunal berhembus dari Benua Asia menuju Australia. Ketika mendekati khatulistiwa khususnya di Timur Laut Pulau Kalimantan, angin monsun tersebut mengalami defleksi/pembelokan sehingga berarah timur laut (Lau and Wang 2005).

Selanjutnya pada Periode JJAS, terjadi peningkatan signifikan gelombang dari arah Selatan Tenggara (SSE) hingga Barat (W). 50% kejadian gelombang pada periode JJAS berasal dari arah tersebut dengan kontribusi gelombang dominan 32.4% dari arah Selatan (S) hingga Barat Daya (SW). Pada periode JJAS Angin monsunal bergerak dari arah tenggara (Benua Australia) menuju Benua Asia, ketika mendekati Khatulistiwa angin tersebut mengalami defleksi/pembelokan arah menjadi Selatan dan Barat Daya. Sirkulasi kedua angin monsunal tersebut membangkitkan hidrodinamika gelombang di sekitar Pulau Panjang dimana arah dan tinggi gelombang dikendalikan oleh arah, kecepatan, dan morfologi daerah pembangkitan gelombang dalam hal ini *fetchlength* dan batimetri kedalaman perairan.

Perbedaan kontras rezim gelombang antara kedua monsun tersebut menunjukkan karakteristik *Monsoonal Wave Climate*. *Wave Climate* perairan Pulau Panjang menunjukkan asosiasi yang kuat terhadap sirkulasi angin monsunal yang memiliki siklus periodis intraannual. Pada periode peralihan baik Transisi I maupun Transisi II, Distribusi gelombang pada perairan terlihat cukup merata pada semua arah. Terkecuali gelombang dari arah Timur (Laut Sulawesi) yang terlihat cukup signifikan kontribusinya terhadap statistik gelombang. Kontribusi gelombang dari Laut Lepas dalam hal ini Laut Sulawesi menunjukkan signifikansi *diurnal sea breeze* dalam membangkitkan gelombang di Perairan



Pulau Panjang secara khusus dan Pesisir Timur Laut Kalimantan pada umumnya. Lebih lanjut dapat dikatakan bahwa gelombang dari arah timur yang terjadi sepanjang tahun merupakan karakteristik dasar gelombang perairan di wilayah tersebut. Rezim gelombang lokal tersebut mengalami penguatan akibat intensifikasi angin pada masing-masing periode monsun.

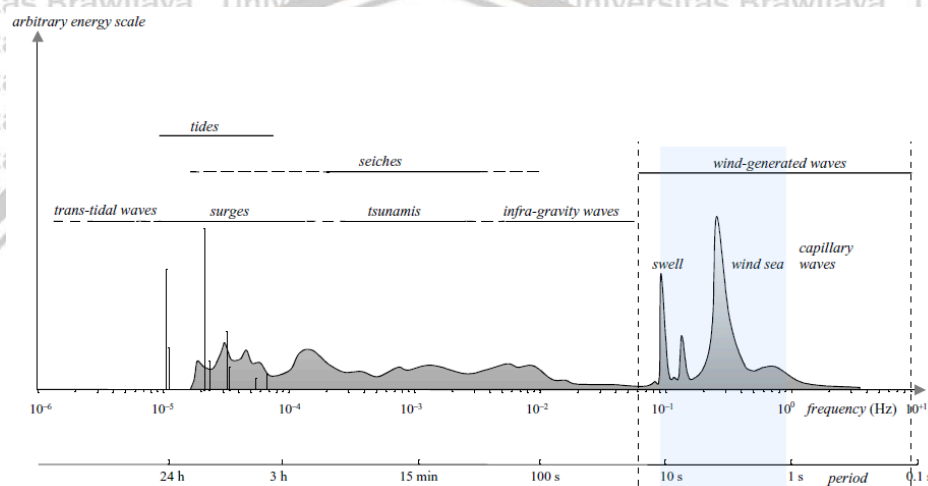
Pada saat Monsun Timur Laut aktif di periode DJFM, frekuensi tinggi gelombang signifikan terbanyak berasal dari arah Barat Laut — Timur dengan tinggi gelombang yang cukup berbahaya berasal dari Utara Timur Laut (NNE) dan Timur Laut (NE). Oleh karenanya masyarakat sepanjang pesisir Timur Laut Kalimantan (Kepulauan Derawan, Tana Kuning, Tarakan, Nunukan dan Sebatik) menyebut periode DJF sebagai musim Utara dimana Angin dan Gelombang dominan berasal Utara hingga Timur Laut. Pada saat Monsun Barat Daya aktif di periode JJAS, terjadi peningkatan frekuensi tinggi gelombang signifikan dari arah Selatan (S) hingga Barat Daya (SW). Musim angin dan gelombang pada periode ini oleh masyarakat lokal disebut dengan Musim Selatan.

Tabel 13. Distribusi Frekuensi Periode Gelombang (%) Perairan di sekitar Pulau Panjang pada saat Monsun Timur Laut, Monsun Barat Daya dan Transisi.

Arah Gelombang	% Frekuensi Periode Gelombang NE Monsoon					% Frekuensi Periode Gelombang T1 dan T2					% Frekuensi Periode Gelombang SW Monsoon				
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10
N	0	1.031	9.462	0	0	0	0.717	4.805	0	0	0	0.717	4.805	0	0
NNE	0	0.258	4.381	0.074	0.037	0	0.388	2.577	0.019	0	0	0.388	2.577	0.019	0
NE	0	0.663	4.971	0	0	0	0.581	3.081	0.019	0	0	0.581	3.081	0.019	0
ENE	0	1.141	6.996	0	0	0	0.814	5.251	0	0	0	0.814	5.251	0	0
E	0	7.695	4.971	0	0	0	8.603	6.53	0.039	0	0	8.603	6.53	0.039	0
ESE	0	3.351	0.258	0	0	0	4.088	0.426	0	0	0	4.088	0.426	0	0
SE	0	1.657	0	0	0	0	2.771	0.019	0	0	0	2.771	0.019	0	0
SSE	0	2.504	0	0	0	0.039	3.255	0.019	0	0	0.039	3.255	0.019	0	0
S	0	5.596	0	0	0	0	9.029	0.019	0	0	0	9.029	0.019	0	0
SSW	0	2.725	0	0	0	0	6.801	0	0	0	0	6.801	0	0	0
SW	0	2.982	0	0	0	0	5.716	0	0	0	0	5.716	0	0	0
WSW	4.308	0.11	0	0	0	4.67	0.078	0	0	0	4.67	0.078	0	0	0
W	6.001	0.847	0	0	0	6.627	0.911	0	0	0	6.627	0.911	0	0	0
WNW	0	7.216	0	0	0	0	7.169	0.039	0	0	0	7.169	0.039	0	0
NW	0	7.769	2.135	0	0	0	6.898	1.143	0	0	0	6.898	1.143	0	0
NNW	0	5.56	5.265	0.037	0	0	4.088	2.751	0	0	0	4.088	2.751	0	0



Berdasarkan hasil perhitungan diketahui bahwa periode maksimum yang dapat dicapai oleh gelombang di sekitar Pulau Panjang sebesar 10 detik. Periode gelombang merupakan salah satu komponen yang menjadi batasan klasifikasi gelombang laut. Hasil perhitungan periode dan tinggi gelombang signifikan ( $H_{m0}$ ) berada dalam syarat batas/kriteria Gelombang Terbangkit angin menurut Holthuijsen (2007). Hal ini juga mengkonfirmasi validitas perhitungan gelombang pada perairan Pulau Panjang dan sekitarnya.

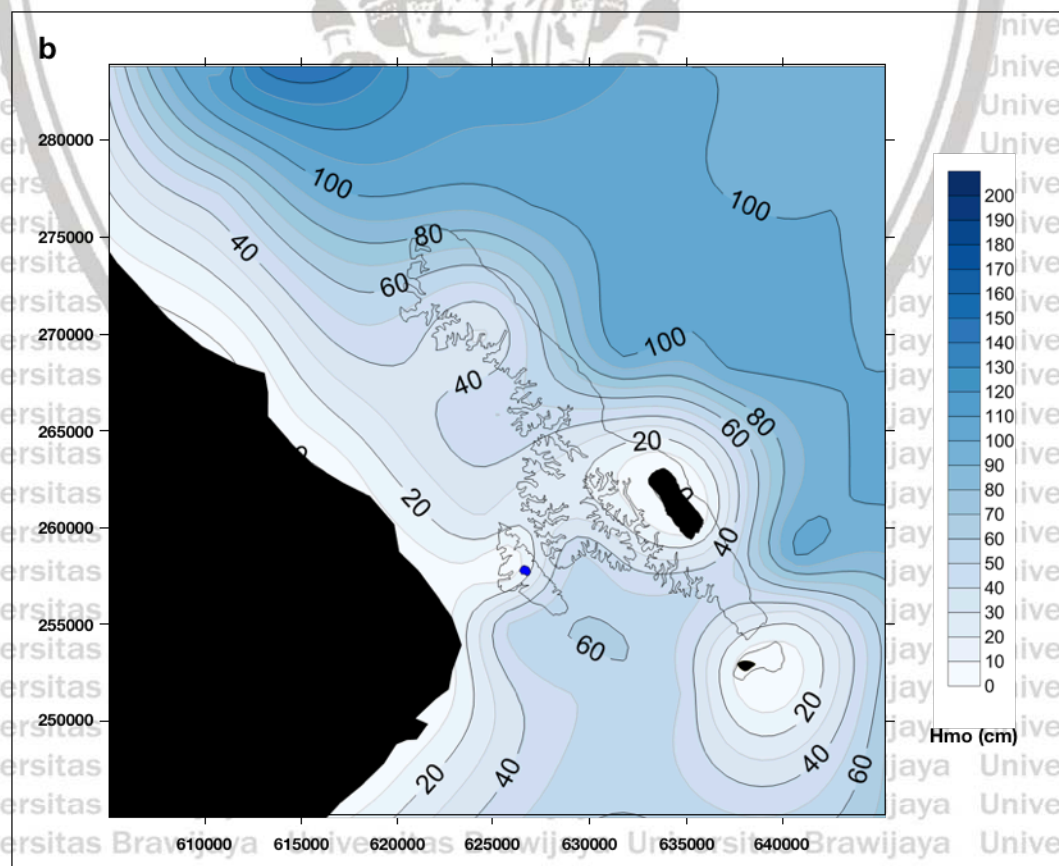
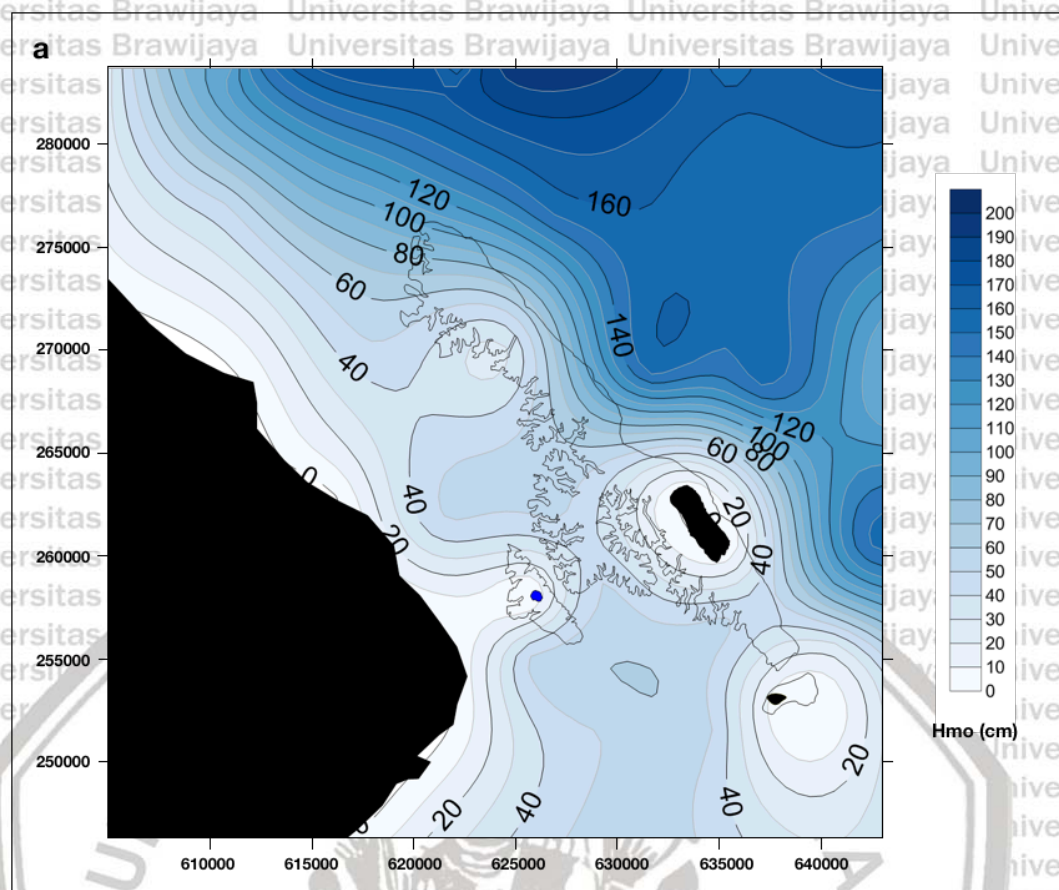


Gambar 36. Klasifikasi gelombang laut berdasarkan frekuensi, periode dan tingkat energi (Holthuijsen 2007).

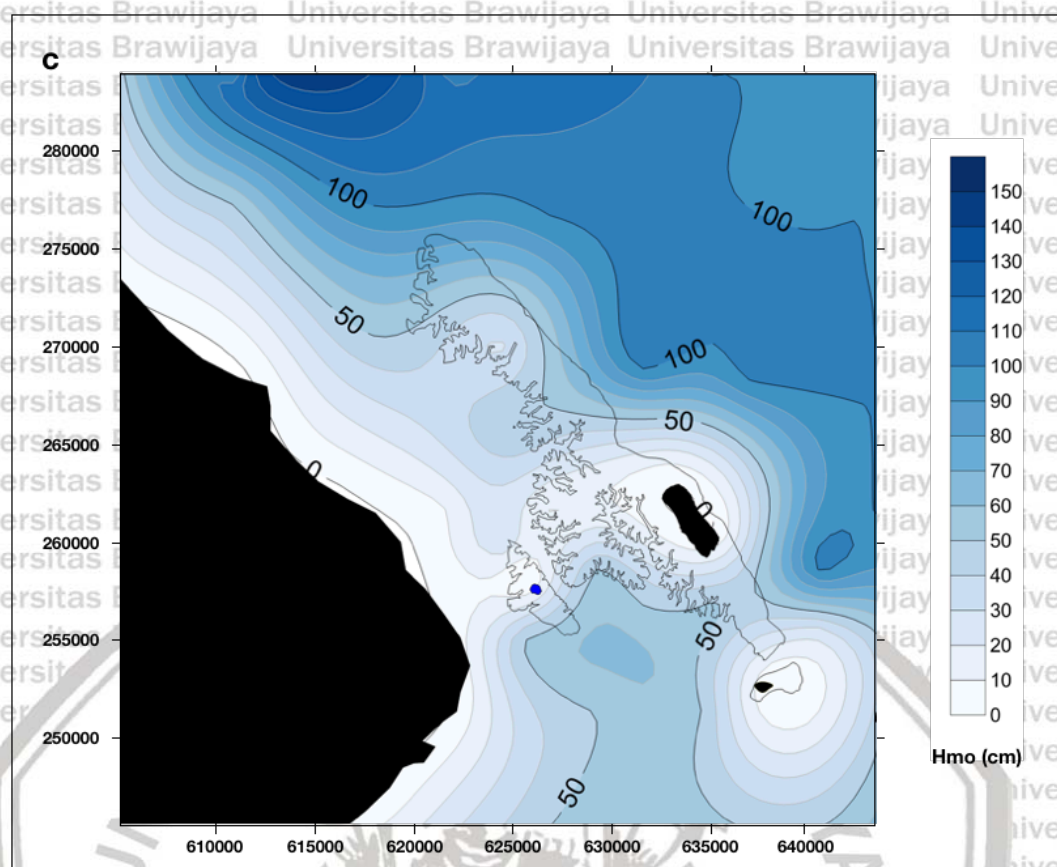
Gambar 37 menunjukkan distribusi tinggi gelombang di kedua monsun dan periode transisinya. Secara umum terlihat bahwa terjadi peluruhan tinggi gelombang ketika mendekati barisan Barrier Reef (karang penghalang).

Selanjutnya gelombang mengalami transformasi dan deformasi akibat *shoaling effect* dimana berkurangnya kedalaman pada reef flat (paparan terumbu). Secara teoritis tinggi gelombang maksimum setelah mengalami efek pendangkalan tidak dapat melampaui 1/3 tinggi kolom perairan. Merujuk model yang dihasilkan, tinggi gelombang menjelang dan setelah melintasi tepi reef flat mengalami penurunan secara gradual. Penurunan tinggi gelombang terus berlangsung setelah melewati reef flat dan mendekati daratan utama Pulau Kalimantan.









Gambar 37. Model distribusi tinggi gelombang signifikan ( $H_{m0}$ ) di sekitar Pulau Panjang (a) Monsun Timur Laut, (b) Monsun Barat Daya, dan (c) Transisi 1 dan 2 digabungkan.

Pola transformasi gelombang dari arah laut menghasilkan bentuk penjaran gelombang dari laut lepas menuju pesisir pantai di Pulau Panjang.

Gelombang tinggi yang merambat dari laut lepas bergerak menuju pantai mengalami transformasi/perubahan tinggi dan arah yang disebabkan *shoaling effect* (efek berkurangnya kedalaman selama propagasi gelombang menuju garis pantai). Mula-mula tinggi gelombang stabil pada perairan yang dalam dan bergerak stasioner, namun ketika bertemu dan melewati tepi reef flat, gelombang mulai tidak stabil. Selanjutnya arah dan tinggi ombak terus mengalami perubahan (transformasi) yang tidak menentu sementara sedangkan arah gelombang cenderung mengikuti profil kedalaman pantai yang dilintasinya.



Model distribusi tinggi gelombang signifikan di kedua monsun dan periode transisinya (Gambar 37a, b dan c) memperlihatkan bahwa terjadi peluruhan tinggi gelombang ketika mendekati tepian Barrier Reef (karang penghalang).

Selanjutnya gelombang mengalami transformasi dan deformasi akibat *shoaling effect* dimana berkurangnya kedalaman pada reef flat (paparan terumbu). Secara teoritis tinggi gelombang maksimum setelah mengalami efek pendangkalan tidak dapat melampaui  $1/3$  tinggi kolom perairan. Merujuk model yang dihasilkan, tinggi gelombang menjelang dan setelah melintasi tepi reef flat mengalami penurunan secara gradual. Penurunan tinggi gelombang terus berlangsung setelah melewati reef flat dan mendekati daratan utama Pulau Kalimantan.

Di perairan selat antara Daratan Kalimantan dan Reef Flat Pulau Panjang, tinggi gelombang terbangkit angin tidak dapat mencapai ketinggian 1 meter. Hal ini dikarenakan sempitnya ruang pembangkitan gelombang (*fetchlength*) yang tersedia meskipun besarnya kecepatan angin secara teoritis mampu untuk membangkitkan tinggi gelombang yang optimal. Oleh karena itu tinggi gelombang pada perairan Pulau Panjang yang berdekatan dengan pesisir daratan Kalimantan tergolong dalam kategori *Fetch Limited*. Dengan kata lain tinggi gelombang optimal yang dibentuk oleh setiap kelas kecepatan angin dibatasi oleh kondisi fetch. Gelombang di sebelah barat Pulau Panjang hanya mengalami kenaikan pada saat Monsun Barat Daya (JJAS). Gelombang yang datang dari arah Selatan – Barat Daya tersebut hanya sedikit lebih tinggi dibandingkan periode lainnya. Hal ini dikarenakan sebelum mendekati tepi reef Flat Pulau Panjang, gelombang tersebut telah mengalami transformasi dan deformasi saat melintasi Pulau Derawan dan Karang Mangkalasa. Karang mangkalasa adalah hamparan terumbu dangkal tenggelam (*submerged reef*) yang cukup luas dan nampaknya merupakan perpanjangan terumbu Pulau Derawan ke arah Barat.



Karakteristik angin di sekitar khatulistiwa secara permanen bergerak dari timur yang dikenal dengan *Tropical Easterlies* (Lee 1999). Keberadaan lokal diurnal sea breeze dekat permukaan laut yang bergerak dari timur (Laut Sulawesi) ke barat (Daratan Kalimantan) turut mendukung pembangkitan gelombang di sebelah timur Pulau Panjang. Hal ini menyebabkan gelombang cenderung tinggi sepanjang tahun dibandingkan sisi barat yang terlindungi.

Pada saat Asian Monsoon aktif di bulan DJF, frekuensi tinggi gelombang signifikan terbanyak berkisar antara kategori gelombang rendah (0.5 – 1.25 m) sampai gelombang sedang (1.25 - 2.50 m). Gelombang ini berasal dari arah Barat Laut – Timur dengan tinggi gelombang yang cukup berbahaya berasal dari Utara Timur Laut (NNE) dan Timur Laut (NE). memasuki periode Transisi 1 MAM, perairan menjadi lebih tenang ditandai oleh gelombang rendah (0.5 – 1.25) sampai gelombang sedang (1.25 - 2.50 m) yang dibangkitkan oleh Angin Laut dari arah timur (Laut Sulawesi). Pada saat Australian Monsoon aktif di bulan JJA, terjadi peningkatan frekuensi tinggi gelombang signifikan dari arah Selatan (S) hingga Barat Daya (SW) terbanyak berkisar antara kategori gelombang rendah (0.5 – 1.25 m) sampai gelombang sedang (1.25 - 2.50 m). Gelombang berasal dari arah Barat Laut – Timur dengan gelombang dominan berasal dari Utara Timur Laut (NNE) dan Timur Laut (NE).

Berdasarkan *waverose* (gambar 35) dan model distribusi tinggi gelombang (gambar 37) dapat disimpulkan bahwa *Wave Climate* di Kepulauan Derawan pada umumnya dan secara khusus Pulau Panjang termasuk dalam *Monsoonal Wave Climate* atau Iklim Gelombang Monsunal. *Monsoonal Wave Climate* merupakan pola peningkatan intensitas dan tinggi gelombang laut musiman yang berhubungan dengan siklus monsun. Hal ini ditunjukkan oleh dinamika spasio temporal gelombang pada perairan, khususnya pada periode Monsun Timur Laut dan Monsun Barat Daya dimana tinggi dan arah gelombang



ditentukan oleh kecepatan dan arah angin dominan pada kedua monsun. Selain itu, pada kedua monsun terjadi peningkatan frekuensi kejadian gelombang tinggi dibandingkan pada periode transisi.

Tabel 14. Frekuensi count gelombang dari ke empat musim\*

Arah	Monsun Timur Laut									Transisi 1									Monsun Barat Daya									Transisi 2									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
N	0	0	0	28	113	142	2	0	0	0	0	3	17	82	72	2	0	0	0	0	0	17	32	28	1	1	0	0	0	0	17	48	42	2	0	0	0
NNE	0	0	0	7	48	51	20	0	0	3	0	2	11	33	47	15	0	0	0	0	0	9	21	12	4	0	3	0	0	1	6	17	14	7	0	1	0
NE	0	0	0	18	67	50	18	0	0	0	0	0	19	54	34	14	0	1	0	0	0	10	27	15	2	0	0	0	0	11	29	20	7	1	0	0	
ENE	0	2	29	117	70	3	0	0	0	0	0	0	22	83	61	2	0	0	0	0	0	19	54	21	0	0	0	0	0	20	84	39	2	0	0	0	
E	0	0	0	44	165	135	0	0	0	0	0	0	52	188	217	0	0	0	0	0	1	54	172	156	0	0	0	0	0	34	170	119	1	0	2	0	
ESE	0	0	0	11	80	7	0	0	0	0	0	0	13	107	11	0	0	0	0	0	0	30	157	6	1	0	0	0	0	11	80	11	0	0	0	0	
SE	0	8	0	37	0	0	0	0	0	0	0	11	0	56	0	0	0	0	0	0	10	0	91	0	0	0	0	0	4	0	72	1	0	0	0	0	
SSE	0	7	35	26	0	0	0	0	0	0	0	11	33	37	1	0	0	0	0	0	12	83	90	0	0	0	0	0	8	41	38	2	0	0	0	0	
S	0	16	82	54	0	0	0	0	0	0	0	23	106	74	1	0	0	0	0	0	43	267	165	4	0	0	0	0	25	153	85	0	0	0	0	0	
SSW	0	17	46	11	0	0	0	0	0	0	0	20	100	34	0	0	0	0	0	0	45	186	90	0	0	0	0	0	22	118	56	1	0	0	0	0	
SW	0	18	48	15	0	0	0	0	0	0	0	22	68	36	0	0	0	0	0	0	19	115	86	0	0	0	0	0	13	90	64	2	0	0	0	0	
WSW	0	111	8	1	0	0	0	0	0	0	0	94	6	0	0	0	0	0	0	0	149	22	1	0	0	0	0	1	132	10	2	0	0	0	0	0	
W	0	77	108	1	0	0	0	0	0	0	1	90	93	2	0	0	0	0	0	0	109	110	6	0	0	0	0	0	99	101	3	0	0	0	0	0	
WNW	0	25	90	80	1	0	0	0	0	0	0	17	68	86	0	0	0	0	0	0	21	75	92	5	1	0	0	0	20	95	82	3	1	0	0	0	
NW	0	0	20	191	57	1	0	0	0	0	0	1	15	161	28	1	0	0	0	0	0	16	146	21	3	1	0	0	0	1	26	152	28	1	1	0	0
NNW	0	0	37	114	140	2	1	1	0	0	0	0	19	96	92	2	0	0	0	0	0	21	61	60	4	2	0	0	0	1	19	76	47	0	1	0	0

\* output statistik WRPLOT

Pola gelombang monsun merupakan pola gelombang yang umum terjadi pada daerah yang berada dalam pengaruh angin monsun (Monsoon Region). *Monsoonal wave climate* turut dilaporkan dalam penelitian dari beberapa wilayah diantaranya Pesisir Timur India (Sharmila et al. 2015), Laut Arab Bagian Timur (Kumar and George 2016), Pesisir Barat India (Amrutha, Kumar, and George 2017; Sanil Kumar, Sajiv Philip, and Balakrishnan Nair 2010) Samudera Hindia Bagian Utara (Anoop et al. 2015), Teluk Oman dan Laut Arab Bagian Utara (Chaichitehrani and Allahdadi 2018), Semenanjung Malaysia (Amri et al. 2018; Nur Amalina et al. 2015; Satari et al. 2015) Sabah, Malaysia (Saleh et al. 2010) Filipina (Matsumoto et al. 2020), Selat Sunda (Khoirunnisa, Lubis, and Anurogo 2017), Selat Bali (Sambah et al. 2020), Selat Makassar (Jalil et al. 2020) dan Pesisir Sulawesi Utara (Fadlan et al. 2017).

Mengingat Benua Maritim Indonesia merupakan daerah dengan pola iklim di bawah pengaruh kekuatan monsun maka periode kejadian gelombang akibat cuaca buruk di perairan Indonesia cukup banyak berasosiasi dengan kedatangan siklus monsun terutama di Desember hingga Januari. Penggunaan istilah



monsunal tidak begitu populer di Indonesia. Hal ini dikarenakan penyebutan musim di Indonesia cenderung lebih menitikberatkan pada curah hujan (Musim Hujan dan Kemarau). Sementara itu variabilitas iklim antar wilayah di Benua Maritim Indonesia kurang begitu dipahami oleh mayoritas penduduk. Di sepanjang kepulauan Indonesia terdapat beberapa region iklim. Masyarakat sepanjang pesisir Jawa hingga Timor serta sebagian Sulawesi (Selatan, Barat dan Tenggara) mengenal musim tersebut dengan istilah Musim Timur (Monsun Australia) dan Musim Barat (Monsun Asia). Masyarakat di pesisir timur laut Kalimantan dan pesisir Laut Sulawesi yang mendiami semenanjung utara pulau Sulawesi (Sulawesi Tengah, Gorontalo, Sulawesi Utara) menyebutnya dengan Musim Utara (Monsun Asia) dan Musim Selatan (Monsun Australia). Perbedaan penamaan musim angin dan gelombang tinggi tersebut dikarenakan orientasi arah angin dan gelombang yang berbeda pada lokasi tersebut.

Ahli klimatologi bahkan belum menemukan delineasi yang final mengenai batasan wilayah iklim di Indonesia. Beberapa peneliti menyebutkan ada 4 region iklim di Indonesia (Aldrian 2001, 2008; Aldrian et al. 2007; Aldrian and Dwi Susanto 2003), sementara itu Hamada et al., (2002) menyebutkan 5. Bahkan untuk 1 daratan pulau besar seperti Kalimantan yang merupakan teritorial 3 negara (Indonesia, Malaysia dan Brunei Darussalam) terdapat 8 tipe region sub-klimat (Dambul and Jones 2007). Demikian pula mengenai Indeks Monsun yang belum final untuk wilayah di Benua Maritim Indonesia. Hermawan (2010) mengajukan indeks monsun untuk Indonesia, Dambul (2010) juga mengajukan indeks spesifik untuk Borneo/Kalimantan.

Selain karena perbedaan instrumen dan metode, keragaman indeks monsun yang dihasilkan juga dikarenakan kompleksnya variabel yang bekerja dan berpengaruh terhadap sirkulasi atmosfer di Benua Maritim Indonesia. Variabel-variabel yang tersedia juga memiliki fluktuasi dan dinamika baik secara spasial



maupun temporal. Variabel musiman antara lain; siklus Monsoon, Madden Julian Oscillation/MJO (Aldrian 2001, 2008; Aldrian et al. 2007; Aldrian and Dwi Susanto 2003; Madden and Julian 1971; Tjasyono 2012) dan fenomena *Borneo Vortex* (Isnoor, Firdianto, and Rejeki 2019; Koseki et al. 2014; Saragih, Fajarianti, and Winarso 2018; Syahidah, Dupe, and Aldrian 2015). Juga adanya variabel interannual seperti ENSO, Indian Ocean Dipole Mode (Martono 2014; Sambah et al. 2020; Wijaya et al. 2020) dan Tropospheric Biennial Oscillation/TBO (Chang and Li 2000). Selain itu variabilitas angin dan gelombang di perairan Indonesia juga mendapatkan pengaruh dari Typhoon atau Siklon Tropis.

## **5.6 Hidro-Oseanografi & Morfodinamika Reef Flat Pulau Panjang; Perspektif Sedimentology**

Pertumbuhan ekosistem laut dangkal (Mangrove, Padang Lamun, dan Terumbu Karang) dikontrol oleh proses geologis (Flemming 2012; Imran et al. 2016). Proses geologis jangka panjang membentuk daratan dan laut. Dalam waktu bersamaan proses hidro-oseanografi laut yang dipengaruhi dan mempengaruhi sistem klimatologi juga turut bekerja membentuk permukaan bumi beserta ekosistem di atasnya (Flemming 2012).

Pulau Kalimantan memiliki karakteristik geologis batas kontinen yang berbeda antara sisi barat dan timur. Sisi barat Kalimantan merupakan bagian dari Dangkalan Sunda (*Sunda Shelf*), Sedangkan sisi timur berbatas dengan Pulau Sulawesi. Kesamaan geologis batuan sisi timur Kalimantan (bagian selatan hingga Tanjung Mangkalihat) dan sisi barat Sulawesi (bagian selatan hingga Donggala) menunjukkan dahulu keduanya satu bagian dan kemudian terpisah (Hall 2017, 2018; Hall and Nichols 2002) Ekstensi (pembukaan) dan subsidensi (penurunan) pada selat Makassar diperkirakan berlangsung antara Paleogene Awal dan Miocene Awal (Hall and Nichols 2002; Imran et al. 2016). Selat Makassar dan Laut Sulawesi yang berhubungan langsung memiliki sejarah



geologi yang berbeda. Di bagian utara Laut Sulawesi mulai terbentuk pada akhir periode eocene (Hall 2013, 2017; Hall and Nichols 2002).

Parameter tekstural sedimen merupakan proksi yang sangat baik untuk mengetahui karakteristik dari proses hidrodinamika jangka panjang pada ekosistem laut. Ukuran dan distribusi partikel sedimen menyediakan petunjuk mendasar mengenai sumber, kerentanan untuk terbongkar dan terangkut oleh aliran air, proses transportasi, dan deposisi sampel sedimen (Blott and Pye 2001, 2012; Folk 1974; Folk and Ward 1957; McLaren 2014; McLaren and Bowles 1985; Moiola, R.J. and Weiser, D. 1968).

Sub bab ini memberikan informasi dinamika sedimen permukaan laut dan lingkungan pengendapan Pulau Panjang yang menjadi habitat padang lamun. Kondisi sedimen merupakan hasil proses jangka panjang berbagai proses biologis dan geologis pada lingkungan dimana interaksi klimatologi dan hidro-oseanografi berlangsung. Kajian dinamika sedimen sangat penting dalam upaya menjelaskan karakteristik ekosistem laut dangkal dari pulau-pulau terumbu karang yang berkaitan dengan variabilitas ekologis, geomorfologis, oseanografis dan klimatologis. (Aldrian 2001; Aldrian et al. 2007; Aldrian and Dwi Susanto 2003; Imran et al. 2016; Solihuddin et al. 2019).

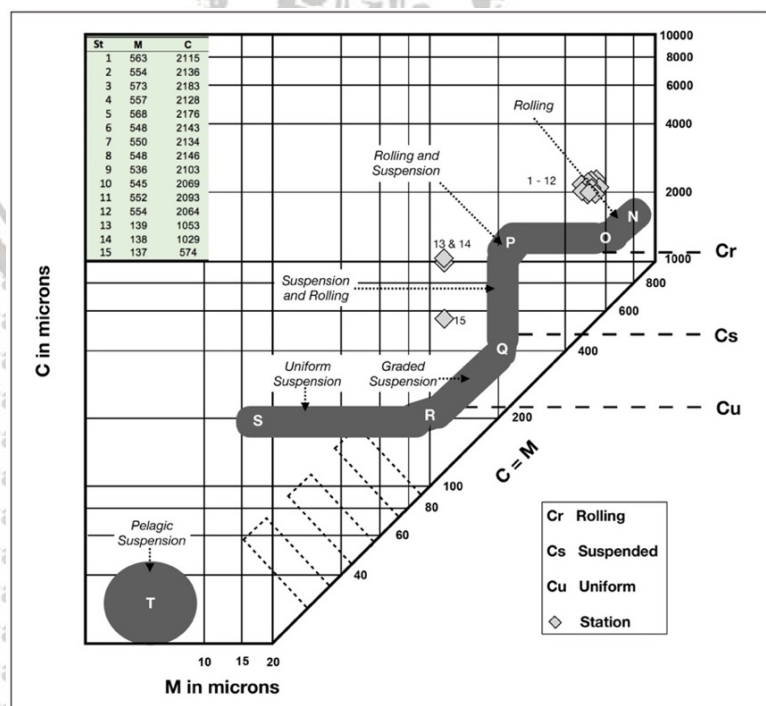
#### 5.6.1 Hidrolika Sedimen

Diagram CM pada gambar 38 menunjukkan model pengangkutan sedimen berdasarkan karakteristik butir dan tingkatan energi medium pengangkut. Diagram C-M dibentuk oleh sebaran nilai C ( $d_{90}$ ) dan nilai M (median/ $d_{50}$ ) dari sampel sedimen yang diplotkan pada skala micron (Passega 1957, 1964; Passega and Byramjee 1969). Passega dan Byramjee (1969) menentukan 3 kelompok yang meliputi Cr (C – *rolling*), Cu (C – *uniform suspension*) and Cs (C – *graded suspension*). Garis Cr menunjukkan batas terbawah diameter dari partikel yang terangkut oleh mekanisme rolling/ berguling



sepanjang dasar perairan. Garis Cs merupakan batas maksimum dari diameter partikel yang terangkut dengan mekanisme suspensi bertingkat, sedangkan garis Cu menunjukkan batas maksimum dari partikel sedimen yang terangkut dalam suspensi yang homogen. (Mycielska-DowgiałŁo and Ludwikowska-Kedzia 2011; Passega and Byramjee 1969).

Passega & Byramjee (1969) membagi area tertentu dalam plot yang ditandai oleh N, O, P, Q, R, S, T. Titik tersebut menunjukkan mekanisme sedimentasi tertentu, dimana N menunjukkan sampel yang tertransportasi secara eksklusif melalui mekanisme *rolling*, Sementara antara OP menunjukkan transportasi dengan *rolling* dengan kontribusi dari suspensi. PQ melibatkan mekanisme suspensi dengan sedikit *rolling*, QR menunjukkan transportasi dalam bentuk suspensi bertingkat (umumnya ditandai dengan *saltasi*), RS menunjukkan angkutan sedimen dalam bentuk suspensi homogen, dan T untuk pengendapan suspensi pada perairan yang tenang (Mycielska-DowgiałŁo and Ludwikowska-Kedzia 2011; Passega and Byramjee 1969).



Gambar 38. Diagram CM sedimen permukaan reef flat Pulau Panjang.



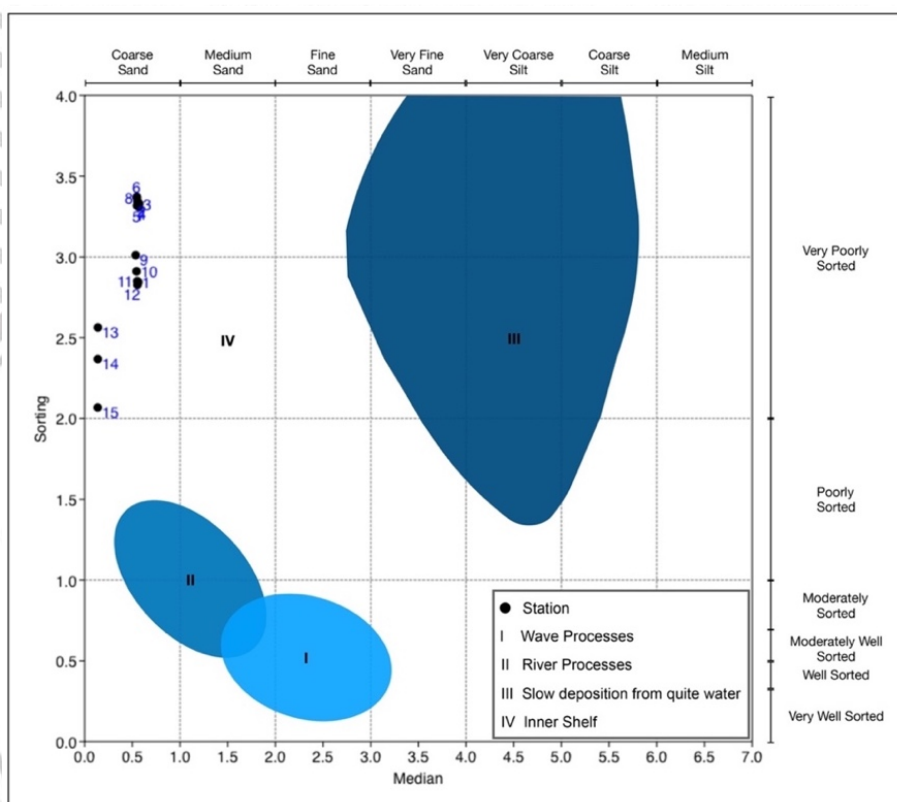
Diagram CM pada gambar 38 menunjukkan rolling dan suspensi dasar sebagai mekanisme transport sedimen yang utama. Sampel stasiun 1 – 12 terletak disekitar segmen NOP yang mengindikasikan rolling sebagai mode transport dominan dengan sedikit kontribusi dari partikel yang terangkut dalam bentuk suspensi. Keadaan ini dijelaskan oleh fakta bahwa sedimen berukuran sedang (antara yang tertransport oleh mekanisme *rolling* dan yang mudah tersuspensi kembali) kembali sedikit proporsinya dalam sampel. Sementara itu sampel stasiun 13 – 15 terletak pada segmen PQ yang menunjukkan bahwa mekanisme transport sedimen utama adalah dengan suspensi dengan sedikit partikel *rolling*. Passega & Byramjee (1969) mengemukakan bahwa segment ini berisi sedimen yang terbentuk oleh suspensi yang ditunjukkan oleh point Q, sementara butir sedimen yang tertransport oleh mekanisme rolling tersedia dalam jumlah yang terbatas dalam sampel dan tidak mempengaruhi nilai median sedimen secara umum.

Berdasarkan pada mode klasifikasi hidrolika sedimen pada gambar 38, kita dapat melacak sejarah transportasi dan deposisi sampel. Temuan ini mengimplikasikan adanya kompleksitas dari proses hidrodinamika yang berlangsung di reef flat Pulau Panjang. Distribusi karakteristik tekstural sampel sedimen menunjukkan bahwa stasiun 1-12 memiliki hidrodinamika gelombang dan arus yang relative kuat dan mampu memicu turbulensi dasar perairan. Fenomena ini yang selanjutnya memfasilitasi pergerakan partikel sedimen. Sementara itu kondisi hidrodinamika pada stasiun 13-15 tidak cukup kuat untuk memicu turbulensi dasar untuk menggerakkan partikel dengan mekanisme *rolling*. Dengan demikian hanya material sedimen berukuran kecil yang dapat terpengaruh dan tertransportasi.



### 5.6.2 Tipologi *Depositional Environment*

Stewart (1958) menyediakan hubungan antara sedimen dan lingkungan pengendapan (*sedimentary environment*) dalam bentuk diagram yang populer dengan nama “Diagram Stewart” (gambar 39). Diagram dibentuk menggunakan plot bivariate antara nilai Median dan Sortasi dari parameter tekstural sedimen.

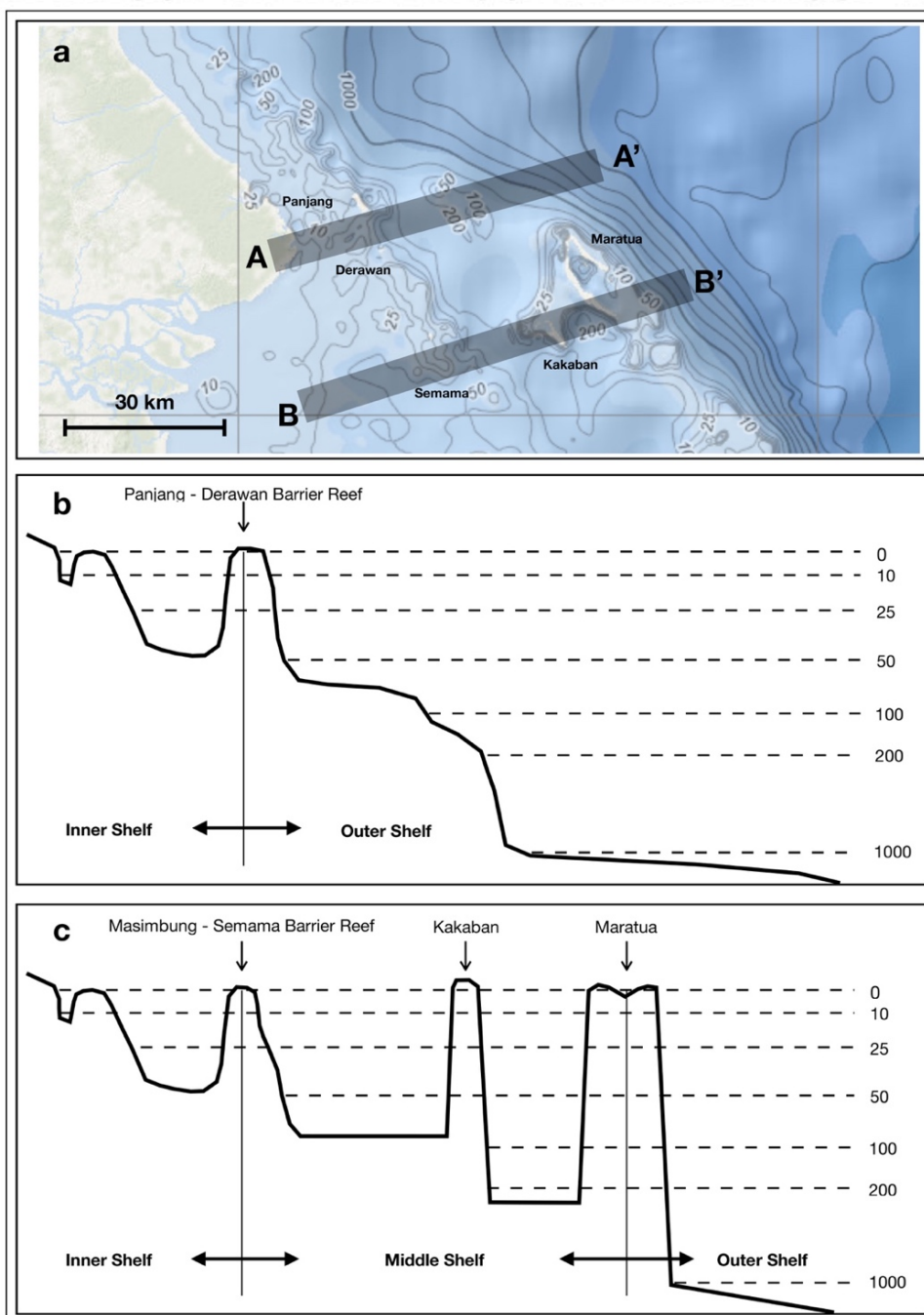


Gambar 39. Distribusi hasil analisis sedimen permukaan reef flat Pulau Panjang pada Stewart diagram dimana nilai sortasi di plot median dalam satuan  $\phi$ .

Stewart mengidentifikasi tiga kelompok proses lingkungan pengendapan antara lain; (1) *wave processes* (proses gelombang), merupakan lingkungan pengendapan didepan/luar surf zone, (2) *river processes* (proses sungai), dicirikan oleh sedimen yang terangkut oleh sungai dan terutama banjir (3) *quite waters* (proses laut lepas), merupakan lingkungan pengendapan partikel sedimen secara perlahan pada laut lepas (Stewart 1958). Segmen lain diluar ketiga kelompok dalam diagram merupakan lingkungan pengendapan sedimen yang



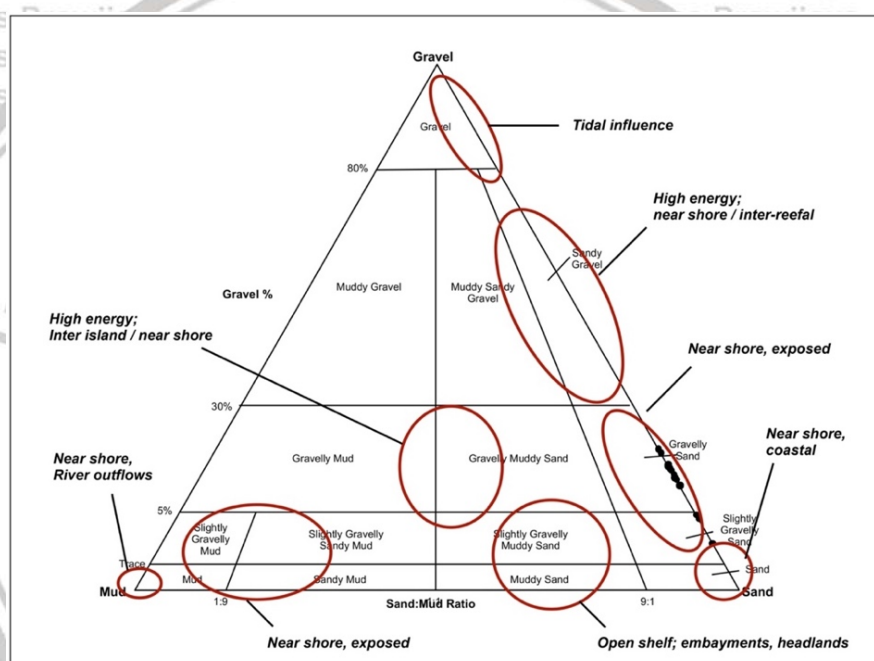
termasuk dalam kategori proses *inner shelf* (Jagodziński et al. 2012; Kanhaiya et al. 2017; Lukman, Ayuba, and Alege 2018; Parthasarathy et al. 2016).



Gambar 40. Pembagian tiga zona terumbu karang di Berau Barrier Reef (*Inner Shelf*, *Middle Shelf* dan *Outer Shelf*) berdasarkan posisi relatif terhadap gugusan terumbu penghalang dan batimetri perairan. (a) cross section A-A' dan B-B', (b) cross section A-A' menunjukkan dua zona yakni *Inner Shelf* dan *Outer Shelf*, (c) cross section B-B' menunjukkan tiga zona yakni *Inner Shelf*, *Middle Shelf* dan *Outer Shelf*



Plot median dan sortasi dari sedimen menunjukkan bahwa lingkungan pengendapan sedimen Reef Flat Pulau Panjang Island termasuk dalam kategori proses *inner shelf* (Gambar 39). Plot model pada diagram Stewart menunjukkan kesesuaian dengan zonasi spasial *Barrier Reef* Kepulauan Derawan berdasarkan batimetri. *Barrier reef* merupakan pembatas antara zona *Inner Shelf* dan *Middle Shelf* sistem terumbu. *Barrier reef* pulau panjang berhadapan langsung dengan Laut Sulawesi (dengan kedalaman >1000 m), dengan demikian langsung membatasi *inner shelf* dan *outer shelf*.



Gambar 41. Diagram Segitiga Stewart menunjukkan hubungan karakter tekstural reef flat Pulau Panjang dengan profil/proses energi hidrodinamis yang bekerja pada lingkungan Inner Shelf.

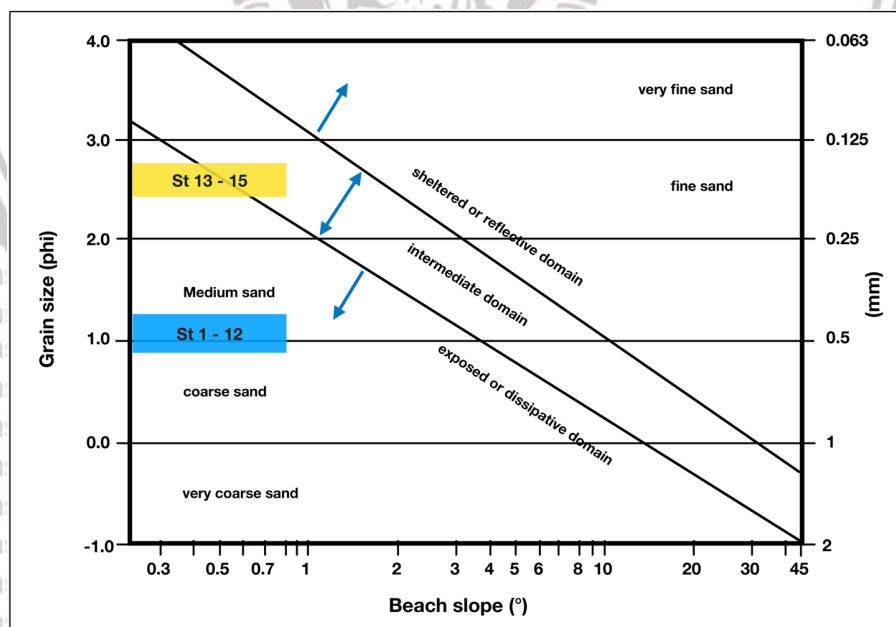
Berdasarkan temuan dan fakta sebelumnya bahwa reef flat Pulau Panjang merupakan sistem terumbu karang penghalang dan merupakan *inner shelf*, maka dilakukan overlay segitiga tekstur sedimen pulau panjang terhadap segitiga Mathews (Mathews, E., Heap, A., Woods 2007). Segitiga tersebut menunjukkan konsistensi hubungan asosiatif antara karakteristik sedimen, lingkungan pengendapan dan proses hidrodinamika dominan pada reef flat



Pulau Panjang adalah kondisi sedimen pantai terbuka dan berdekatan dengan pantai yang terpengaruh oleh arus dan gelombang dari Laut Sulawesi (gambar 41).

### 5.6.3 Morfodinamika Pantai

Terdapat hubungan hubungan antara morfodinamika pantai, wave climate dan ukuran butir sedimen (Flemming 1982, 2012; Flemming and Fricke 1983). Pada dasarnya morfodinamika pantai merupakan hasil interaksi antara gelombang dan sedimen laut. Berdasarkan ukuran butir dan sedimen dan profil kemiringan pantainya, Reef flat Pulau Panjang terbagi atas dua domain morfodinamika pantai yang berbeda yaitu pantai yang dengan domain dissipative (stasiun 1 - 12), dan pantai yang berada dalam domain transisi antara dissipative hingga intermediate (stasiun 13 - 15). Kondisi ini menunjukkan adanya variasi hidrodinamika oseanografi pada sisi barat Pulau Panjang dibandingkan dengan area lain pada reef flat yang mengelilingi Pulau Panjang.



Gambar 42. Plot mean butir sedimen ( $\phi$ ) terhadap profil kemiringan pantai (Diagram Fleming) menunjukkan karakter morfodinamik reef flat Pulau Panjang.



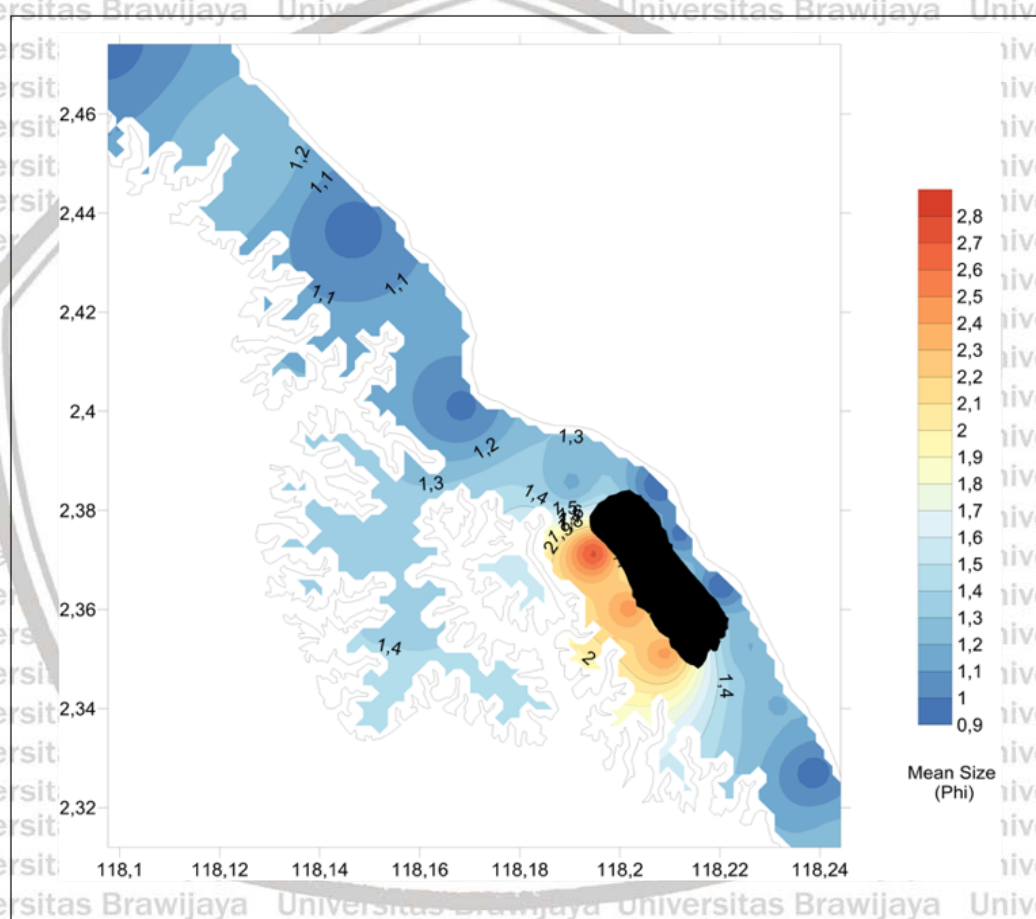
#### 5.6.4 Distribusi Tekstur Sedimen dan Zonasi Padang Lamun

Sejalan dengan Diagram Flemming (Gambar 40), Distribusi mean sedimen menunjukkan adanya pengaruh dari gelombang khususnya yang berkaitan dengan gelombang monsunal (*monsoonal wave climate*) terhadap dinamika sedimen. Pada saat Monsun Barat Daya (Juni - September), kondisi hidrodinamik perairan di sisi barat Pulau Panjang (stasiun 13, 14 dan 15) cenderung meningkat oleh gelombang yang datang dari arah barat daya. Sedangkan stasiun lainnya tersebar pada posisi yang relatif lebih terbuka terhadap laut lepas dalam hal ini Laut Sulawesi. Dengan demikian, hidrodinamika perairan pada stasiun 1 – 12 relatif selalu berada pada kondisi yang tinggi pada semua musim dan mengalami peningkatan saat aktifnya Monsun Timur Laut maupun Monsun Barat Daya.

Keberadaan padang lamun mempengaruhi kemampuan arus dan gelombang untuk mentransportasikan sedimen. Padang lamun mengubah hidrodinamika lingkungan melalui (1) atenuasi energi arus dan gelombang, (2) mengubah profil kecepatan terutama didekat dasar perairan (3) menurunkan kekuatan turbulensi sehingga mencegah pengadukan sedimen (4) pergerakan propagasi *monamis*, (atau pergerakan daun lamun mengikuti irama osilasi gelombang (Koch et al. 2006; Lanuru et al. 2018; Madsen et al. 2001; Potouroglou et al. 2017). Kemampuan mempertahankan sedimen bahkan dilaporkan untuk jenis lamun (Christianen et al. 2013; Paul 2018). Ekpseriman Lanuru et al. (Lanuru et al. 2018) menunjukkan kemampuan lamun dari Kepulauan Spermonde (yang sama dengan jenis lamun di Pulau Panjang) dalam mereduksi turbulensi, intensitas gelombang, dan *shear velocity* bervariasi secara proporsional berdasarkan tinggi kanopi, kerapatan bilah dan karakter morfometrik daun.



Berdasarkan uraian disimpulkan bahwa dinamika sedimen dipengaruhi oleh beberapa faktor yang mempengaruhi hidrolika partikel sedimen, sementara itu secara simultan faktor tersebut saling terpengaruh satu dengan lainnya. Faktor tersebut adalah gelombang, arus, pasang surut dan vegetasi lamun. Energi gelombang, pasang surut dan arus memicu pergerakan sedimen. Berlawanan dengan itu, hamparan padang lamun berperan menahan dan memelihara kestabilan sedimen di sekitarnya.



Gambar 43. Distribusi mean ( $\phi$ ) sedimen permukaan reef flat Pulau Panjang.

Secara spasial, reef flat Pulau Panjang dapat dikategorikan menjadi 2 zona berdasarkan karakter lingkungan pengendapan sedimen dan proses hidrodinamika lingkungannya. Zona pertama berada di sepanjang sisi barat Pulau Panjang yang dicirikan oleh hidrodinamika yang relatif tenang dan



terlindung. Zona ini merupakan habitat vegetasi lamun berukuran kanopi sedang hingga tinggi (*Cymodocea rotundata*, *Thalassia hemprichii* dan *Enhalus Acoroides*), dan memfasilitasi deposisi partikel sedimen berupa pasir halus. Sementara itu, zona kedua merupakan zona yang luas meliputi ujung Barat Laut hingga Ujung Tenggara reef flat yang sepanjang sisi timur Pulau Panjang. Zona ini merupakan sebagai kawasan yang terbuka terhadap expose gelombang, pasang surut dan arus. Zona ini dicirikan dengan kandungan sedimen berupa pasir halus hingga kasar yang dikoloni oleh jenis lamun berukuran kecil hingga sedang (*Halophila ovalis*, *Syringodium isoetifolium*, *Halodule Uninervis* dan *Thalassia Hemprichii*).

### 5.7 Dinamika Ekosistem Padang Lamun Pulau Panjang

Interaksi antara atmosfer dan lautan bersifat timbal balik. Laut mempengaruhi atmosfer dengan temperatur dan kapasitas kalornya. Sementara itu atmosfer mempengaruhi laut dengan anginnya. Sirkulasi angin didekat permukaan mempengaruhi sirkulasi massa air dan proses hidrodinamika lautan. Dinamika pada atmosfer memberikan efek terhadap lautan hingga kedalaman sekitar 200 m (Aldrian 2008). Siklus monsun menyebabkan adanya perubahan/pembalikan arah angin dominan pada perairan yang memicu variabilitas pola hidrodinamika gelombang secara musiman berupa *monsoonal wave climate*. Selanjutnya *monsoonal wave climate* di Pulau Panjang ditengarai memantik variabilitas pada komponen fisik dan kimia di perairan antar musim beserta periode peralihannya. Sub-bab ini mengelaborasi lebih jauh bagaimana kondisi fisik dan kimia perairan antar musim, kondisi ekosistem padang lamun berikut makroinvertebrata asosiatifnya.



### 5.7.1 Dinamika Monsunal Variabel Fisik dan Kimia Lingkungan

Analisis sidik ragam (ANOVA) menunjukkan variabilitas parameter fisik dan kimia perairan yang berkaitan dengan siklus monsun (Tabel 15).

Tabel 15. Ringkasan analisis sidik ragam (ANOVA) variabel fisik dan kimia dari sampel air kolom dan air pori sedimen dari 15 stasiun dan 4 musim di Pulau Panjang. Notasi huruf yang berbeda menyatakan perbedaan nyata berdasarkan Uji Posthoc Tukey dan Least Square Difference pada  $\alpha = 0.05$  ( $n = 60$ ).

	ANOVA Antar Musim						Homogeneous Subset			
	NE x T1	NE x SW	NE x T2	T1 x SW	T1 x T2	SW x T2	NE	T1	SW	T2
<b>Air Kolom</b>										
Temperatur	*	*	*	*	ts	*	a	b	c	b
DO	*	*	ts	*	*	*	a	b	c	a
pH	*	*	*	*	*	*	a	b	c	d
Salinitas	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
TSS	*	ts	*	*	ts	*	a	b	a	b
NO <sub>3</sub> -N	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
PO <sub>4</sub>	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
<b>Air Pori Sedimen</b>										
Temperatur	*	*	*	*	ts	*	a	b	c	b
DO	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
pH	ts	*	ts	*	ts	ts	a	a	b	ba
NO <sub>3</sub> -N	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
PO <sub>4</sub>	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
ORP	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a

\* Berbeda nyata pada alpha 0.05

ts Tidak Terdapat Perbedaan Signifikan

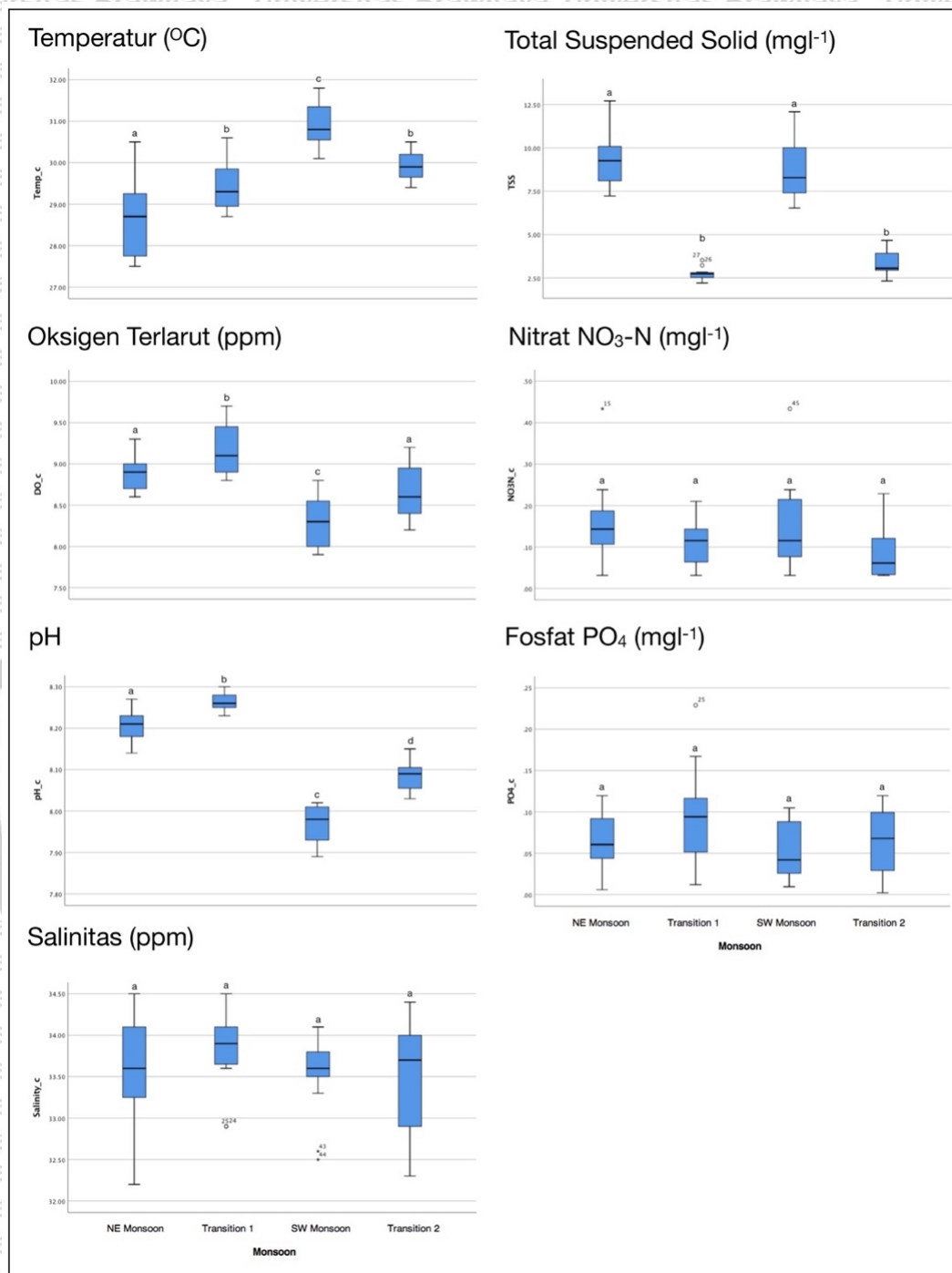
Hasil analisis ANOVA sampel air kolom perairan menunjukkan adanya variabilitas musiman pada temperatur, DO, pH, dan TSS. Sementara itu

Salinitas, [NO<sub>3</sub>-N<sub>columnwater</sub>] dan [PO<sub>4</sub><sub>columnwater</sub>] menunjukkan kondisi yang stabil.

Dinamika musiman pada air pori sedimen ditunjukkan oleh variabel temperatur

dan pH. Adapun [NO<sub>3</sub>-N<sub>porewater</sub>] dan [PO<sub>4</sub><sub>porewater</sub>], DO dan Potensial Reduksi Oksidasi (ORP) menunjukkan kondisi yang stabil antar musim.





Gambar 44. Grafik ANOVA sampel air kolom padang lamun Pulau Panjang. Notasi huruf yang berbeda menyatakan perbedaan nyata berdasarkan Uji posthoc Tukey dan Least Square Difference pada  $\alpha = 0.05$  (n = 60).

Pada kolom perairan, peningkatan hidrodinamika perairan yang diakibatkan kenaikan intensitas gelombang saat Monsun Timur Laut dan Monsun

Barat Daya menyebabkan peningkatan kandungan TSS pada perairan



dibandingkan kedua periode Transisi. Pengamatan lapangan menunjukkan bahwa distribusi kekeruhan perairan berkaitan dengan monsun dimana pada Monsun Barat Daya kekeruhan meningkat signifikan pada sisi selatan hingga barat Pulau Panjang. Sebaliknya pada Monsun Timur Laut kekeruhan terjadi pada sisi barat laut hingga sebelah tenggara Pulau Panjang. Hal ini menunjukkan korelasi antara distribusi kekeruhan dengan *monsoonal wave climate* di Pulau Panjang.

Analisis ANOVA menunjukkan salinitas perairan stabil sepanjang tahun sebagai indikasi kondisi steady state (tunak) yang dipengaruhi input massa air Laut Sulawesi melalui *Indonesian Throughflow* (ITF) atau Arus Lintas Indonesia. *Steady State* salinitas merupakan karakteristik air laut yang tersusun dari ion-ion garam mineral yang bersifat konservatif. Tidak adanya perbedaan signifikan antar musim dari nutrisi  $[\text{NO}_3\text{-N}_{\text{columnwater}}]$  dan  $[\text{PO}_4\text{columnwater}]$  menunjukkan kondisi keseimbangan dinamis. Stabilitas konsentrasi nutrisi dimungkinkan oleh mekanisme adveksi melalui sirkulasi arus dan pasang surut harian sebagai faktor eksternal dan flux siklus material dan nutrisi internal yang berlangsung di padang lamun. Keberadaan lamun mampu mengubah kondisi, kecenderungan dan laju reaksi kimiawi perairan (Unsworth et al. 2012).

ITF dibangkitkan perbedaan gradien tekanan antara Samudera Pasifik dan Samudera Hindia (Gordon 2005; Hasanudin 1998; Potemra 2005; Sprintall and Timothy Liu 2005; Wyrski 1961a, 1987, 2005). Siklus angin muson mempengaruhi pola sirkulasi massa air permukaan di Laut Sulawesi. Pola angin muson tahunan di kawasan Laut Sulawesi ( $1^\circ\text{N}$ ,  $125^\circ\text{E}$ ) didominasi oleh angin meridional, yang bergerak menuju ke Selatan antara Nopember hingga Mei dan sebaliknya menuju Utara pada Juni hingga Oktober (Hu et al. 2019). Keberadaan siklus angin muson mempengaruhi kecepatan arus ITF (Sprintall and Timothy Liu 2005; Wei et al. 2016). Wei et al (2016) menemukan



bahwa pada saat monsun asia (DJF) terdapat peningkatan Aliran massa air dari Laut Sulu ke Laut Sulawesi bagian barat (timur laut kalimantan) melalui Selat Sibutu. Salinitas memainkan peranan dalam pengaturan transport ITF.

Massa air ITF mengalami pencampuran intensif di perairan Indonesia yang diakibatkan oleh siklus pasang surut (Iskandar et al. 2020; Taufiqurrahman, Wahyudi, and Masumoto 2020). Adveksi air tawar di perairan Indonesia menyebabkan penurunan salinitas hingga 0.2 psu pada massa air di *Indonesian Australian Basin* (daerah outflow) khususnya pada tahun-tahun *la nina* (Feng et al. 2018; Phillips, Wijffels, and Feng 2005; Zhang et al. 2016). Hal tersebut dikarenakan saat aliran ITF melintasi perairan Indonesia, terjadi perubahan properti massa air secara signifikan (Feng et al. 2018; Iskandar et al. 2020). Karakteristik massa air Pasifik yang memiliki salinitas lebih tinggi dan relatif lebih hangat mengalami perubahan akibat proses pencampuran oleh pasang surut dan pencampuran turbulen oleh sill (*sill-induced turbulent mixing*) (Iskandar et al. 2020). Pencampuran tersebut dipercaya mempengaruhi konsentrasi karbon, oksigen, dan nutrien dalam hal ini nitrat, fosfat (Iskandar et al. 2020). Hu et al. (2019) mencatat nilai Kontribusi salinitas terhadap variabilitas interannual dari transport ITF sekitar 36%.

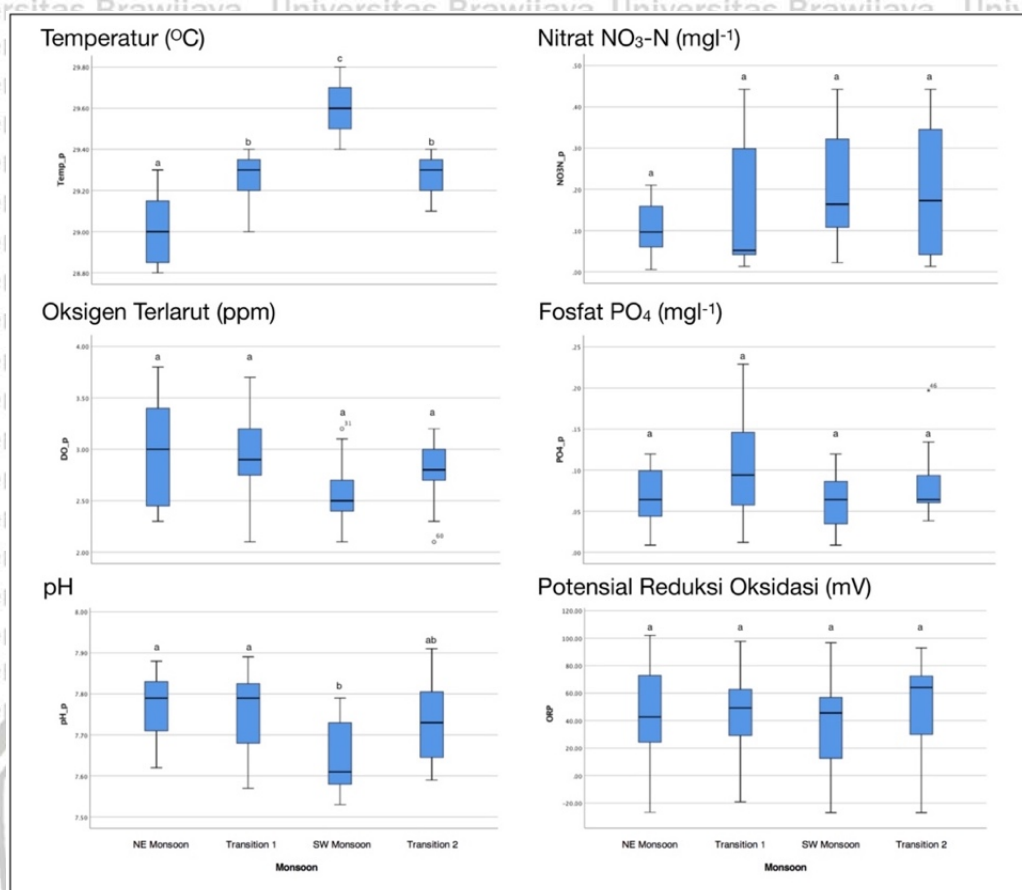
Gordon (2005) menunjukkan bahwa salinitas dikedua monsun pada bagian barat Laut Sulawesi masih sangat tinggi (33.75 ppt di monsun barat daya JJA dan 34 pada saat monsun timur laut DJF). Dengan demikian karakter fisik kimia oseanografi perairan Pulau Panjang masih berada dalam pengaruh Massa Air Pasifik dan belum menunjukkan perubahan signifikan dibandingkan kandungan properti air di lokasi lain sepanjang koridor ITF.



Monsun Barat Daya (Juni – September) merupakan periode musim kemarau di Benua Maritim Indonesia yang turut meningkatkan temperatur perairan Pulau Panjang. Peningkatan temperatur perairan berkorelasi dengan penurunan DO. Tingkat kelarutan oksigen di perairan dipengaruhi oleh temperatur, dimana peningkatan temperatur menyebabkan kelarutan oksigen menurun. Sementara itu penurunan pH perairan saat Monsun Barat Daya diduga kuat berasosiasi dengan situasi kabut asap akibat kebakaran hutan. Kebakaran hutan dan lahan di Kalimantan telah dimulai sejak awal Juli, yang mencapai puncak musim kabut asap pekat pada September hingga Oktober. Musim kemarau yang datang lebih awal dan berkepanjangan memperparah situasi kabut asap. Kabut asap akibat kebakaran hutan saat itu menyebabkan tingkat konsentrasi partikel dan CO<sub>2</sub> (Karbon dioksida) di udara (*lower level atmosphere*) meningkat.

Peningkatan konsentrasi tersebut memicu peningkatan tekanan parsial sehingga mempercepat laju difusi CO<sub>2</sub> dari kolom udara ke perairan. CO<sub>2</sub> bereaksi dengan air laut membentuk ion karbonat (H<sup>+</sup>), pembentukan asam karbonat yang berlebihan akibat tingginya konsentrasi CO<sub>2</sub> terlarut mengganggu kesetimbangan buffer pH air laut dan meningkatkan keasaman (menurunkan pH). Situasi ini menunjukkan adanya proses pengasaman laut (*Ocean Acidification*) yang berasosiasi dengan kebakaran hutan pada periode Monsun Barat Daya berlangsung di Perairan Pulau Panjang.





Gambar 45. Grafik ANOVA sampel air pori sedimen padang lamun Pulau Panjang. Notasi huruf yang berbeda menyatakan perbedaan nyata berdasarkan Uji posthoc Tukey dan Least Square Difference pada  $\alpha = 0.05$  ( $n = 60$ ).

Berdasarkan ANOVA variabel fisik dan kimia air pori sedimen atau air interstisial menunjukkan kondisi keseimbangan dinamis. Secara umum temperatur air pori lebih rendah dibandingkan air kolom. Fluktuasi temperatur air pori mengikuti pola temperatur kolom perairan. Pola ini menunjukkan adanya mekanisme konveksi pada penghantaran kalor/panas yang diterima oleh permukaan hingga ke lapisan kolom air yang lebih dalam. Proses konveksi penting untuk mendistribusikan temperatur secara vertikal terlebih untuk perairan dangkal yang sangat terpengaruh oleh sirkulasi pasang surut dan siklus fotoperiod harian. Kadar oksigen terlarut pada air pori lebih rendah dibanding pada kolom. Pada kolom air di dekat permukaan, terjadi kondisi saturasi oksigen.



Sementara itu kolom air dekat sedimen didominasi oleh organisme heterotrof yang mengonsumsi oksigen.

Kondisi nutrisi baik [ $\text{NO}_3\text{-N}$ ] maupun [ $\text{PO}_4$ ] tidak jauh berbeda antara air kolom dan air pori sedimen. Secara teoritis senyawa  $\text{PO}_4$  lebih banyak pada substrat karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), hal ini dikarenakan afinitas senyawa  $\text{PO}_4$  terhadap sedimen karbonat lebih tinggi dibanding dengan terhadap air (Christianen et al. 2011; Erftemeijer and Middelburg 1993; van Katwijk, M. E W van der Welle, et al. 2011). Temuan Rumhayati (2010) menunjukkan bahwa akumulasi [ $\text{PO}_4$ ] pada sedimen permukaan menurun seiring dengan penambahan kedalaman, demikian pula pada kolom air dimana semakin menjauhi sedimen maka [ $\text{PO}_4$ ] menurun. Potensial reduksi oksidasi (ORP) pada air sedimen menyatakan kecenderungan arah reaksi kimia pada sedimen. Hasil ANOVA menunjukkan kestabilan potensial reduksi oksidasi antar musim. Lebih lanjut, rerata nilai potensial reduksi oksidasi menunjukkan nilai positif atau arah reaksi bersifat oksidasi.

Berdasarkan uraian sebelumnya dapat disimpulkan bahwasanya variabel lingkungan padang lamun Pulau Panjang dapat dibagi menjadi tiga kelompok berdasarkan stabilitas dan variabilitas musimannya. Kelompok variabel pertama berfluktuasi mengikuti pergiliran musim, yakni variabel yang secara langsung berhubungan dengan perubahan fisik musiman. Kelompok ini antara lain TSS yang berkaitan langsung dengan hidrodinamika perairan, kemudian temperatur, DO dan pH yang saling mempengaruhi. Kelompok kedua merupakan variabel yang cenderung mempertahankan kondisi *steady state* (tunak). Salinitas adalah satu-satunya anggota kelompok variabel ini. Kondisi *steady state* salinitas disebabkan garam mineral merupakan ion-ion konservatif dengan waktu residensi yang lama. Kelompok ketiga adalah variabel yang memiliki kesetimbangan dinamis. Kelompok ini merupakan variabel kimia yang bersifat non-konservatif, dinamikanya berkaitan dengan siklus musim, biologis dan geologis jangka



pendek. Kelompok ketiga terdiri dari nutrisi  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4$  baik pada kolom maupun air pori sedimen. Perairan dangkal secara konstan mengalami perubahan dalam berbagai tingkatan skala waktu. Dinamika tersebut meliputi fluktuasi harian yang dipicu oleh *photoperiod diurnal*, *diurnal sea breeze*, siklus pasang surut dan sirkulasi arus yang menyertai pasang surut hingga siklus musiman sebagai akibat gerak revolusi bumi. Pergiliran musim di perairan dapat dikenali melalui perubahan kondisi geofisik yang mempengaruhi proses dan respon bio-kimia organisme dan lingkungan.

Perairan dangkal secara konstan mengalami perubahan dalam berbagai tingkatan skala waktu. Dinamika tersebut meliputi fluktuasi harian yang dipicu oleh *photoperiod diurnal*, *sea breeze*, siklus pasang surut dan sirkulasi arus yang menyertai pasang surut hingga siklus musiman sebagai akibat gerak revolusi bumi. Pergiliran musim di perairan dapat dikenali melalui perubahan kondisi geofisik yang mempengaruhi proses dan respon bio-kimia organisme dan lingkungan. Pada musim angin dan gelombang kuat, terjadi peningkatan kekuatan hidrodinamika yang memicu proses turbulensi pada kolom dan resuspensi pada dasar perairan. Hal ini diikuti kompleksitas respon dan adaptasi biokimia oleh komunitas perairan.

Bersama Nitrat dan Fosfat, Karbon merupakan salah satu unsur nutrisi yang diperlukan oleh lamun (Romero et al. 2006). Peningkatan konsentrasi karbon di perairan hingga pada level tertentu dapat ditolerir oleh lamun. Keberadaan lamun mampu memediasi pergeseran/perubahan kesetimbangan kimiawi sistem karbonat laut (Unsworth et al. 2012). Unsworth (2012) menambahkan bahwa kemampuan lamun ini dapat membantu terumbu karang menghadapi ancaman Pengasaman Laut (*Ocean Acidification*).



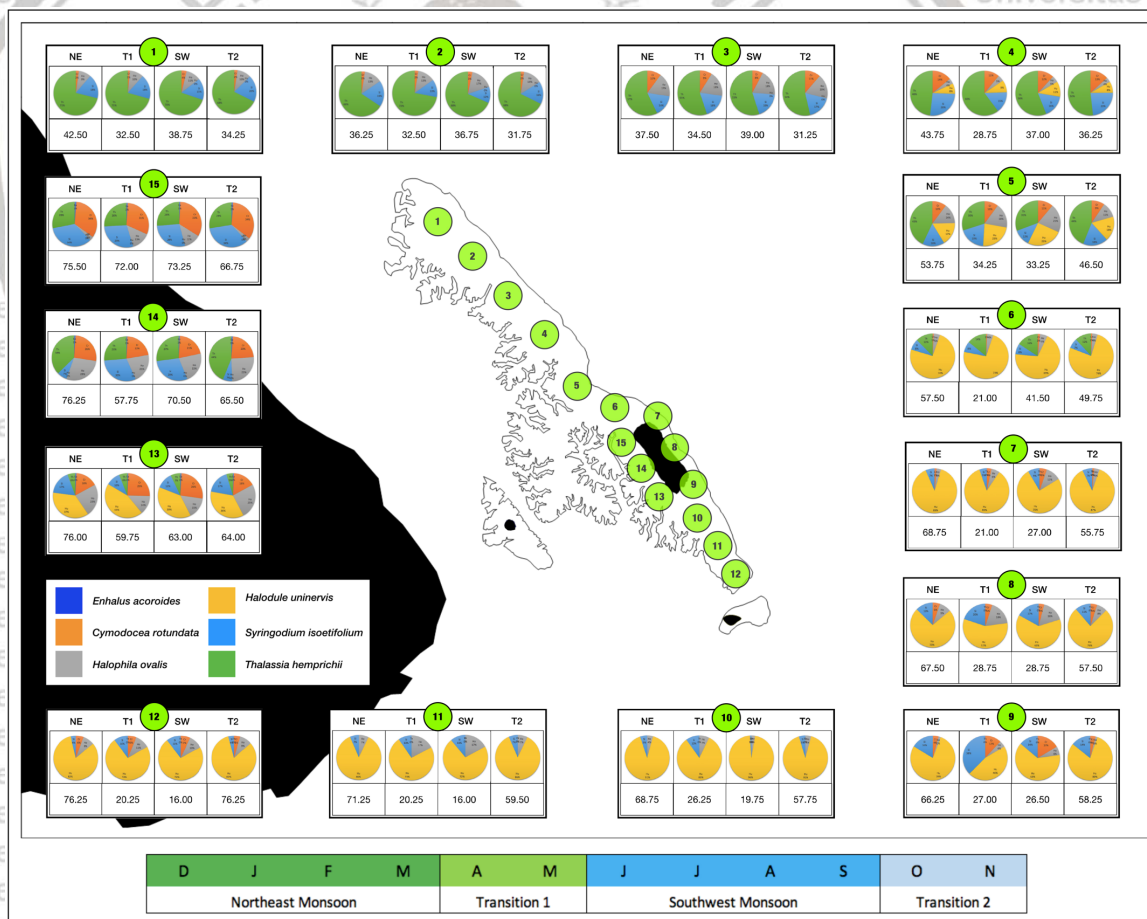
### 5.7.2 Dinamika Monsunal Komunitas Lamun

Ekosistem padang lamun di Pulau Panjang disusun oleh 6 spesies lamun yang berasal dari 2 family.

Tabel 16. Jenis-jenis vegetasi lamun di Reef Flat Pulau Panjang

Family	Spesies
Cymodoceaceae (Vines, 1895 )	<i>Cymodocea rotundata</i> Ascherson & Schweinfurth, 1870 <i>Halodule uninervis</i> (Forsskål) Ascherson, 1882 <i>Syringodium isoetifolium</i> (Ascherson) Dandy, 1939
Hydrocharitaceae (Jussieu, 1789)	<i>Enhalus acoroides</i> (Linnaeus f.) Royle, 1839 <i>Halophila ovalis</i> (R.Brown) J.D.Hooker, 1858 <i>Thalassia hemprichii</i> (Ehrenberg) Ascherson, 1871

Keenam jenis lamun yang mengkoloni reef flat Pulau Panjang terdistribusi secara spasial dan membentuk asosiasi antar jenis (gambar 46).



Gambar 46. Persentase tegakan/komposisi jenis (%) dan penutupan kanopi (%) padang lamun Pulau Panjang dari kedua Monsun (Timur Laut dan Barat Daya) serta periode Transisi 1 dan 2.



Asosiasi dan komposisi jenis vegetasi membentuk zonasi lamun yang dicirikan dengan dominasi relatif kerapatan satu jenis terhadap jenis lainnya.

*Thalassia hemprichii* dan *Halodule uninervis* merupakan dua lamun penciri primer zonasi padang lamun Pulau Panjang. *T. hemprichii* mendominasi sebelah barat Pulau Panjang hingga mengikuti perpanjangan reef flat ke arah barah laut (st 1 – 6 dan 13 – 15). *H. uninervis* mengkoloni sepanjang sisi timur Pulau

Panjang hingga mengikuti perpanjangan reef flat ke arah Tenggara (st 6 – 12).

*Enhalus acoroides* menjadi penciri zonasi sekunder dimana jenis ini hanya ditemukan terbatas di sepanjang sisi barat Pulau Panjang (St 13 – 15) berasosiasi dengan *T. hemprichii* sebagai jenis dominan.

Tabel 17. Status ekologi padang lamun Pulau Panjang berdasarkan indeks Seagrass Ecological Quality Index (SEQI)

Stasiun	NE Monsoon (DJFM)		T1 (AM)		SW Monsoon (JJAS)		T2 (ON)	
	Skor	Kriteria	Skor	Kriteria	Skor	Kriteria	Skor	Kriteria
1	0.778	B	0.768	B	0.771	B	0.762	B
2	0.766	B	0.758	B	0.767	B	0.757	B
3	0.768	B	0.758	B	0.771	B	0.756	B
4	0.814	B	0.796	B	0.801	B	0.799	B
5	0.834	B	0.784	B	0.793	B	0.820	B
6	0.842	B	0.795	B	0.810	B	0.826	B
7	0.831	B	0.735	B	0.747	B	0.805	B
8	0.828	B	0.751	B	0.751	B	0.808	B
9	0.826	B	0.747	B	0.746	B	0.810	B
10	0.798	B	0.713	B	0.700	B	0.776	B
11	0.803	B	0.701	B	0.692	B	0.779	B
12	0.846	B	0.734	B	0.725	B	0.846	B
13	0.912	A	0.879	A	0.886	A	0.888	A
14	0.913	A	0.876	A	0.901	A	0.891	A
15	0.911	A	0.904	A	0.907	A	0.894	A

Keterangan

A : Sangat Baik (0.85 – 1)

B : Baik (0.69 – 0.84)

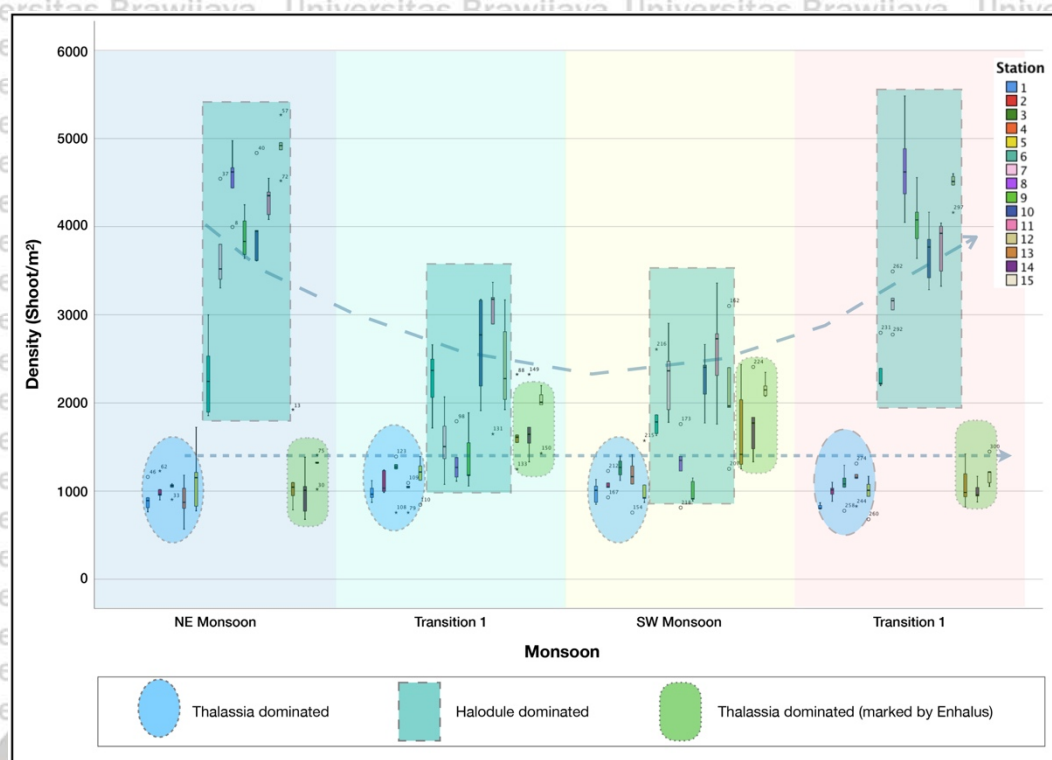
C : Sedang (0.53 – 0.68)

D : Buruk (0.37 – 0.52)

E : Sangat Buruk (0 – 0.36)

Status ekologi padang lamun Pulau Panjang ditentukan berdasarkan nilai Seagrass Ecological Quality Index (SEQI) (Hernawan et al. 2021). Hasil perhitungan SEQI menunjukkan bahwasanya padang lamun berada pada status ekologi yang baik hingga sangat baik.

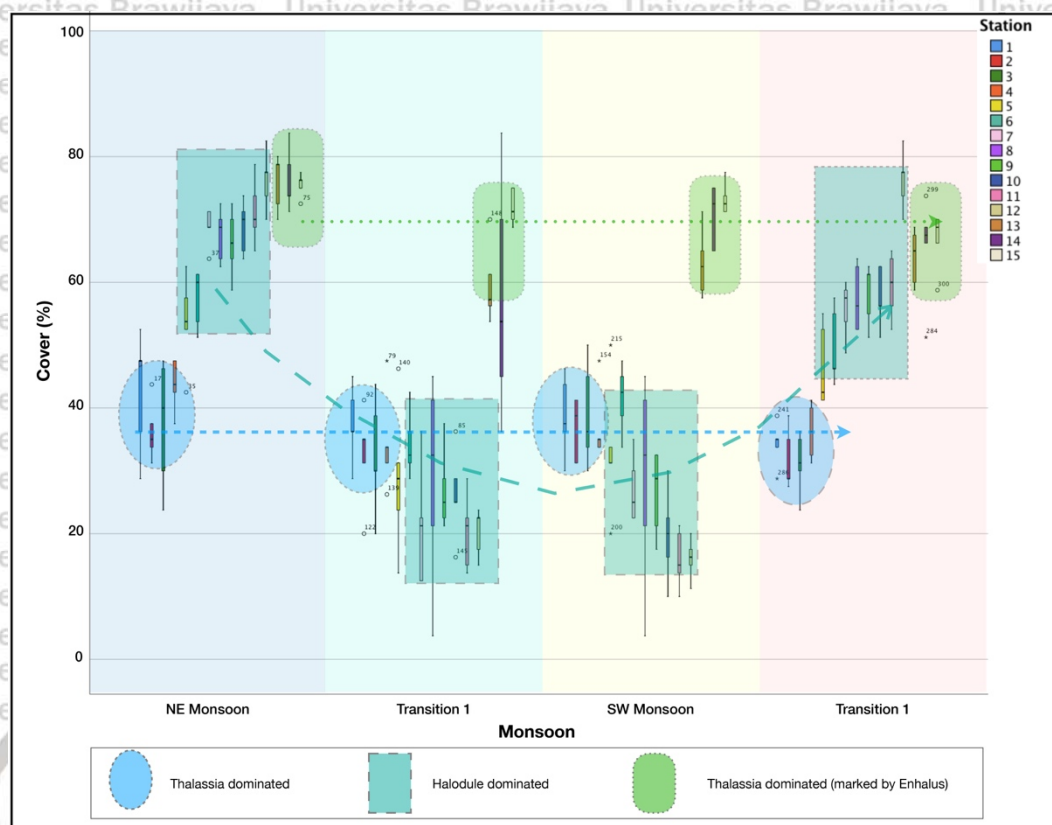




Gambar 47. Dinamika kerapatan total (tegakan/m<sup>2</sup>) padang lamun pulau panjang pada empat periode sampling (n=60). Garis putus-putus menunjukkan trend fluktuasi dan stabilitas penutupan dari kelompok unit sampling (stasiun) berbeda (panah putus-putus biru stasiun stasiun 1-5 dan 12-15, panah putus-putus kelabu stasiun stasiun 6-12).

Stasiun 6 hingga 12 menunjukkan kerapatan yang relatif tinggi dibandingkan stasiun lainnya. Tingginya kerapatan pada stasiun tersebut dikarenakan *H. uninervis* sebagai lamun dominan memiliki karakter ukuran morfometrik kecil. Rerata panjang daun *H. uninervis* di Pulau Derawan yang berdekatan dengan Pulau Panjang sebesar  $52 \pm 21$  mm dengan lebar tidak lebih dari 2 mm (Roem 2013a; Roem and Laga 2014). Panjang daun *H. uninervis* maksimum yang ditemukan di lapangan mencapai 100 – 120 mm dan lebar 2 mm. Dengan demikian kerapatan tegakan per meter persegi jenis ini relatif lebih padat dibandingkan dengan jenis *T. hemprichii* yang memiliki habitus/perawakan sedang (panjang maksimum bilah daun 200 mm dengan lebar 7 mm).





Gambar 48. Dinamika tutupan kanopi (%) padang lamun pulau panjang pada empat periode sampling (n=60). Garis putus-putus menunjukkan trend fluktuasi dan stabilitas penutupan dari kelompok unit sampling (stasiun) berbeda (panah putus-putus biru stasiun stasiun 1-4, panah putus-putus kelabu stasiun stasiun 5-12, panah putus-putus merah stasiun stasiun 13-15).

Gambar 6 menunjukkan dinamika tingkat tutupan kanopi padang lamun dari setiap periode pengamatan. Zona yang didominasi oleh *T. hemprichii* menunjukkan kestabilan tingkat tutupan antar musim dibandingkan zona yang didominasi oleh jenis *H. uninervis*. Secara umum tutupan merupakan fungsi dari kerapatan dimana semakin tinggi jumlah tegakan persatuan luas pada umumnya akan berkorelasi dengan tingkat tutupan. Meski demikian hal tersebut bersifat spesies spesifik. Hal itu juga menyebabkan nilai indeks kondisi ekologis padang lamun (tabel 17) tidak dapat memberikan informasi detail dinamika pada komunitas antar musim. Oleh karena itu para ahli ekologi lamun beberapa tahun belakangan mengembangkan konsep *Spesifik Leaf Area* (SLA) untuk

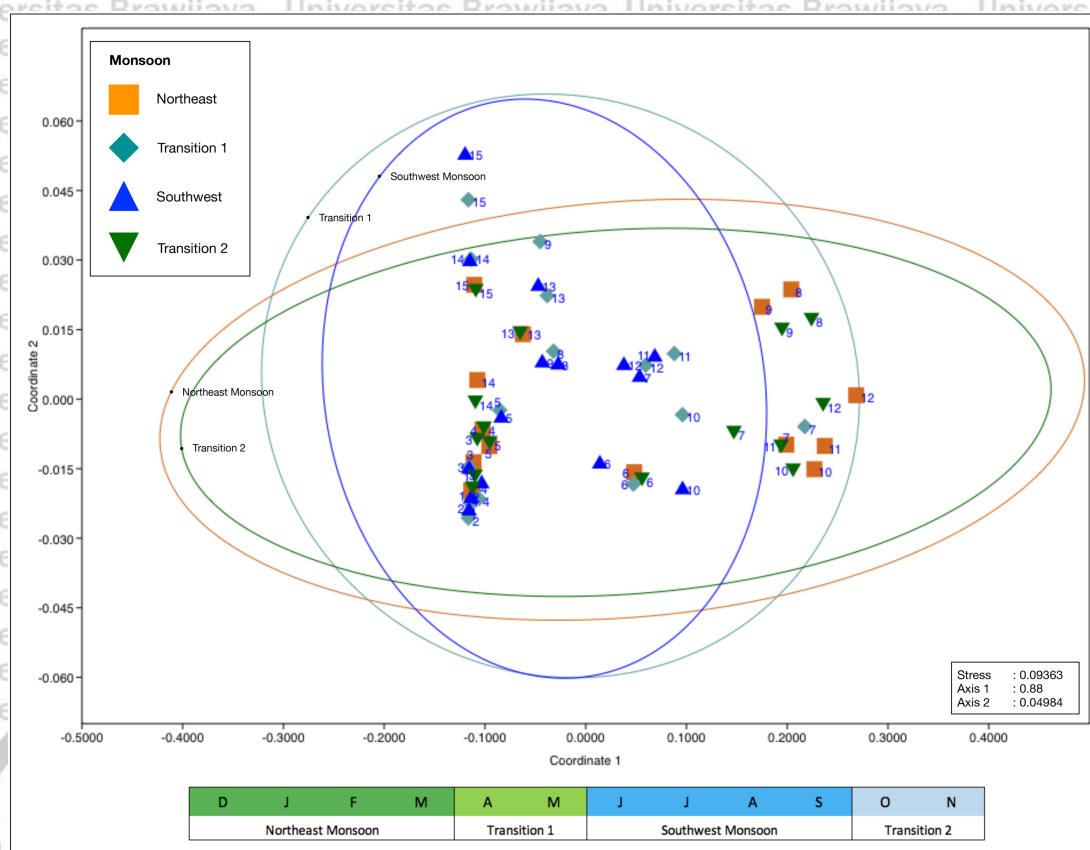


menyatakan hubungan antara jenis lamun tertentu terhadap maksimum area yang dapat tercover oleh kanopinya.

Dinamika komunitas lamun antar musim diselidiki dengan teknik PERMANOVA (Permutational Multivariate Analysis of Variance). PERMANOVA merupakan teknik uji non-parametrik signifikansi perbedaan antara dua kelompok atau lebih dalam kajian ekologi, berdasarkan ukuran 19 distance/dissimilarity (Anderson 2001, 2005, 2017). Penarikan kesimpulan berdasarkan ada tidaknya perbedaan nyata antara centroids dan dispersi data dari satu kelompok terhadap kelompok lainnya (Anderson 2001, 2005, 2017; Sudarshan 2018). Teknik ini paling baik dikombinasikan dengan plot NMDS (Non-Metric Multidimensional Scaling) dan PCoA (Principal Coordinates Analysis) dalam ruang Bray-Curtis, Euclidean, Jaccard dll (Anderson 2017).

Hasil analisis PERMANOVA menunjukkan bahwasanya kondisi komunitas lamun Pulau Panjang berada pada kondisi yang relatif stabil dinamis diantara keempat periode sampling. Lebih lanjut nilai F hitung antar musim menunjukkan kecenderungan kesamaan dispersi plot data komunitas antara Monsun Timur Laut dan Transisi 2. Kemiripan dispersi plot berlaku juga pada saat Monsun Barat Laut dan Transisi 1.





Gambar 49. Skema partisi geometri untuk analisis PERMANOVA padang lamun dari 15 sampling unit pada 4 periode sampling pada ruang Euclidean dua dimensi (bivariate). Ordinasasi Nonmetric multidimensional scaling (nMDS) dari sampling units berdasarkan ketidaksamaan Bray–Curtis pada kerapatan 6 jenis lamun dari total  $N = 60$  sampling units di Pulau Panjang. Centroid dari ellips menunjukkan pusat tingkat kesamaan antar lokasi. Kesamaan simbol dan warna menunjukkan kelompok unit sampling dari musim yang sama.

Model partisi geometrik menunjukkan posisi relatif sentroid keanekaragaman beta ( $\beta$ -diversity) vegetasi lamun antar musim pada ruang euclidean. Pola kecenderungan berdasarkan nilai F hitung ditunjukkan pada plot NMDS dimana komposisi dan struktur komunitas lamun pada saat Monsun Timur Laut dan Transisi 2 memiliki pola dispersi yang serupa. Sementara itu dispersi komposisi dan struktur komunitas lamun pada saat Monsun Barat Laut sama dengan saat Transisi 1.

Kepekaan model NMDS ditentukan berdasarkan “Stress Value” (Kruskal 1964). Nilai Stress merupakan ukuran ketidaksesuaian antara data



dengan hasil pengukuran model. Nilai Stress yang mendekati nol menunjukkan tingkat keandalan model yang semakin sempurna (Kruskal 1964; Legendre and Legendre 2003). "Sempurna" dalam arti kekuatan relasi hubungan monoton yang sempurna antara perbedaan (*dissimilarities*) dan jarak (*distance*) antar kelompok (Kruskal 1964).

Tabel 18. Kriteria nilai Stress dalam mengukur kepaakaan model penskalaan multidimensional (Kruskal 1964).

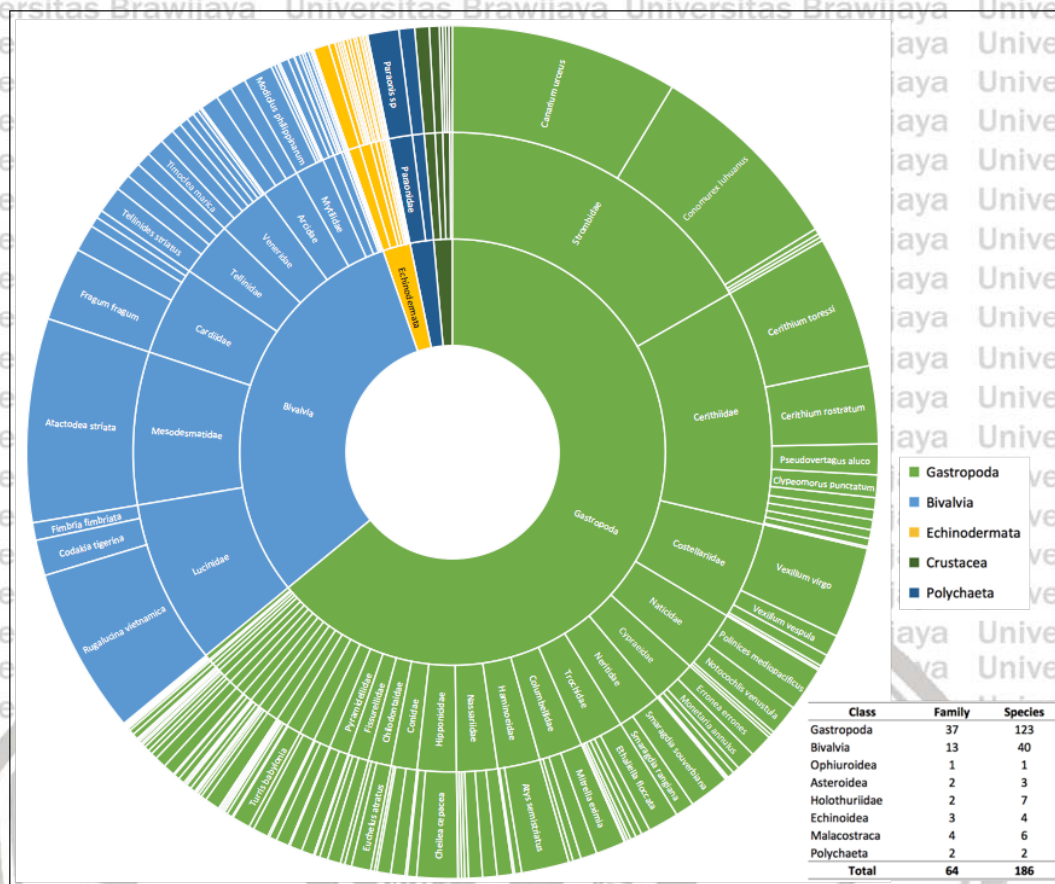
Stress Value (%)	Kategori
0 - 2.5	Sempurna
2.5 - 5.0	Sangat Baik
5.0 - 10.0	Baik
10.0 - 20.0	Cukup
> 20	Kurang

Nilai stress dari plot NMDS analisis PERMANOVA kondisi padang lamun antar musim mendekati 0 (0.094) menunjukkan tingkat kehandalan model dalam menjelaskan dinamika  $\beta$ -diversity vegetasi lamun antar musim. Rincian skor axis NMDS dapat dilihat pada lampiran 11.

### 5.7.3 Dinamika Monsunal komunitas Makroinvertebrata

Berdasarkan hasil identifikasi sampel makroinvertebrata diketahui bahwa padang lamun di Pulau Panjang memiliki tingkat keanekaragaman hayati yang sangat tinggi. Terdapat 186 Spesies makroinvertebrata dari 64 Family yang berasosiasi dengan padang lamun. Terdiri dari 8 Class antara lain Gastropoda, Bivalvia, Ophiuroidea, Asteroidea, Holothuroidae, Echinoidea, Malacostraca dan Polychaeta (daftar jenis makroinvertebrata selengkapnya pada lampiran 5). Makroinvertebrata dengan kelimpahan yang tinggi antara lain dari Family Strombidae (*Canarium urceus*, *Conomurex luhuanus*) dan Cerithidae (*Cerithium spp.*). Arfiati *et al.* (2019) juga melaporkan tingginya kelimpahan dari genus *Cerithium* yang berasosiasi dengan padang lamun di Paciran, Lamongan.

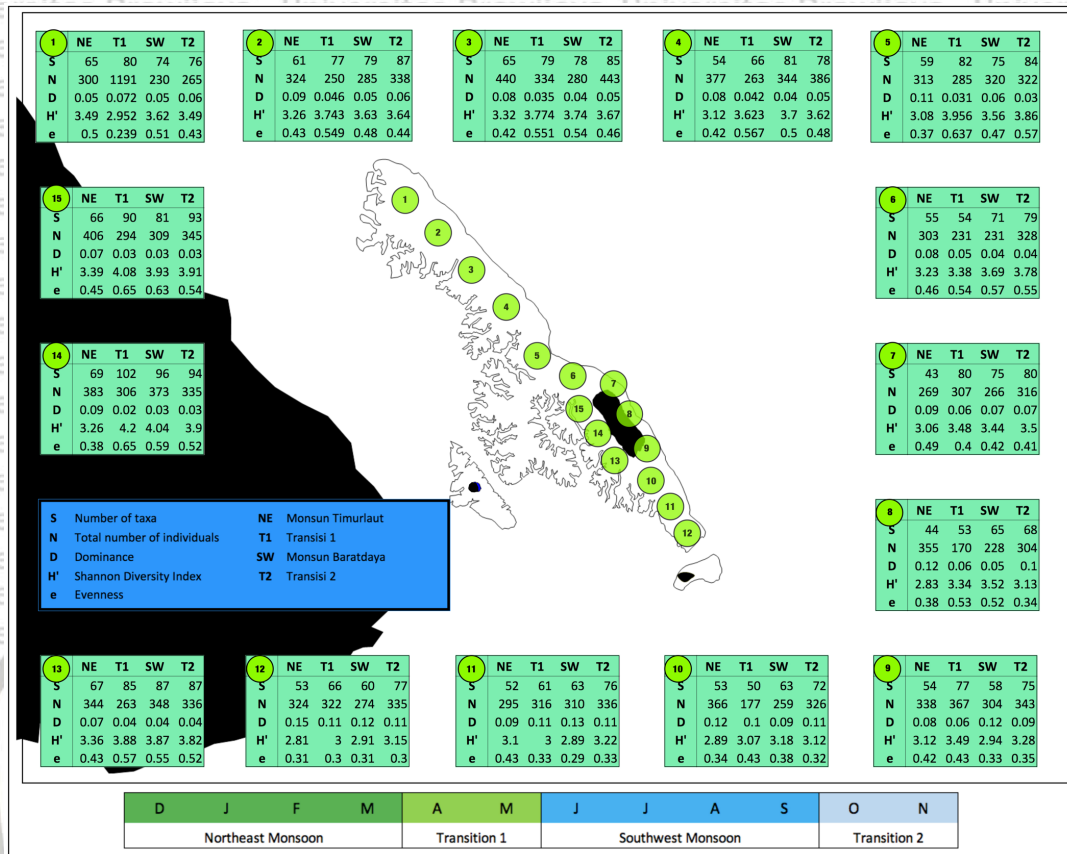




Gambar 50. Komposisi jenis dan kelimpahan relatif Makroinvertebrata asosiasi Padang Lamun Pulau Panjang.

Keanekaragaman alfa ( $\alpha$ -diversity) merepresentasikan tingkat keanekaragaman hayati secara terbatas pada suatu sampling unit (stasiun) pada kurun waktu tertentu atau periode pengambilan sampel. Keanekaragaman alfa umumnya dinyatakan dengan jumlah atau tingkat kelimpahan jenis. Gambar 51 menunjukkan nilai distribusi beberapa parameter keanekaragaman alfa dari komunitas makroinvertebrata yang hidup berasosiasi dengan padang lamun Pulau Panjang pada Monsun Timur Laut, Monsun Barat Daya, serta kedua Periode Transisi.



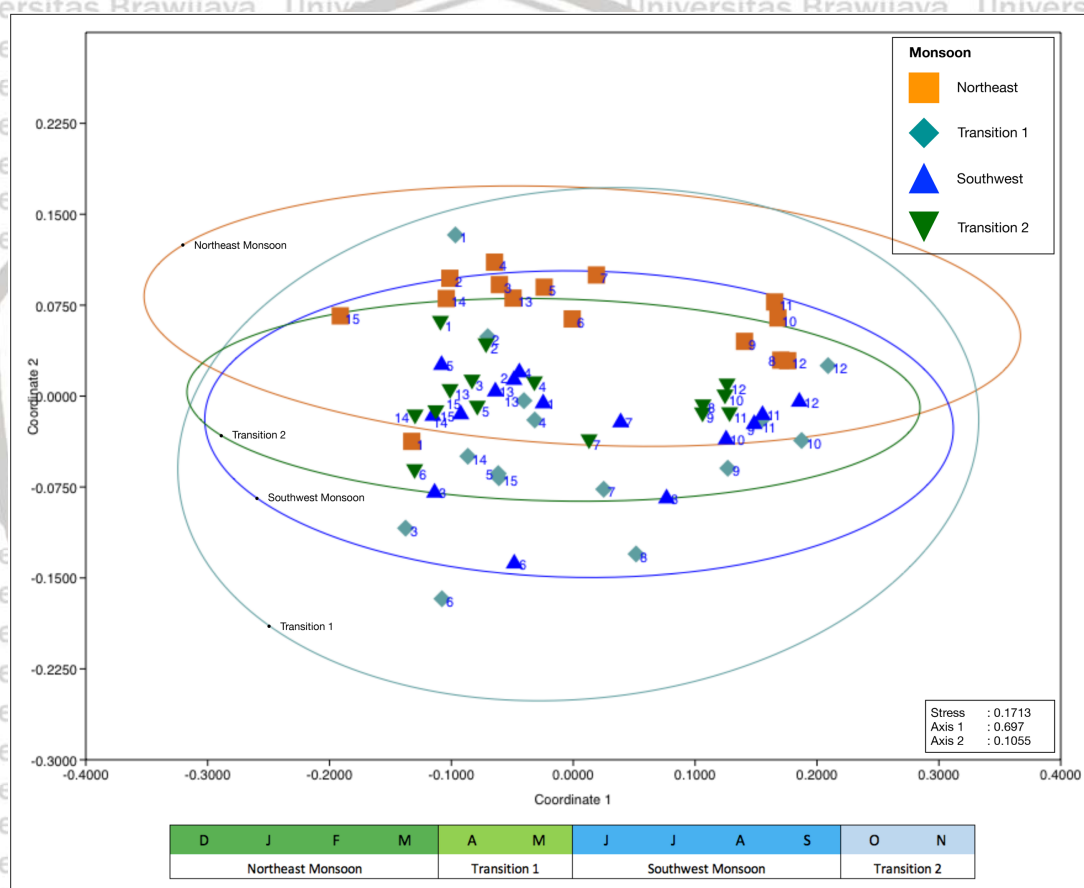


Gambar 51.  $\alpha$ -diversity (S, N, D, H' dan e) dari komunitas makroinvertebrata padang lamun Pulau Panjang dari kedua Monsun (Timur Laut dan Barat Daya) serta periode Transisi 1 dan 2.

Berdasarkan hasil analisis diketahui bahwa komunitas makroinvertebrata di setiap stasiun berada pada kondisi keanekaragaman yang tinggi dan stabil pada semua periode pengambilan sampel. Indeks Shannon merepresentasikan tingkat keanekaragaman jenis yang tinggi, sementara indeks Simpson D konsisten mendekati 0 menunjukkan tidak ada taksa yang mendominasi. Demikian pula Indeks kemerataan Shannon (e) konsisten menunjukkan nilai rendah pada semua periode pengamatan yang mengkonfirmasi bahwa kelimpahan jenis dari setiap unit sampling sangat bervariasi.



Dinamika antar musim dari komunitas makroinvertebrata diselidiki dengan metode PERMANOVA. Hasil analisis PERMANOVA menunjukkan bahwasanya terdapat dinamika pada  $\beta$ -diversity komunitas makroinvertebrata diantara keempat periode sampling. Lebih lanjut nilai F hitung antar musim menunjukkan bahwa kondisi makroinvertebrata pada saat Monsun Timur Laut berbeda dengan ketiga periode lainnya. Sementara itu tidak ada perbedaan signifikan kondisi makroinvertebrata diantara Transisi 1, Monsun Barat Daya dan Transisi 2.



Gambar 52. Skema partisi geometri untuk analisis PERMANOVA Makroinvertebrata dari 15 sampling unit pada 4 periode sampling pada ruang Euclidean dua dimensi (bivariate). Ordinasasi Nonmetric multidimensional scaling (nMDS) dari sampling units berdasarkan ketidaksamaan Bray-Curtis dari Family macroinvertebrata dari total N = 60 sampling units di Pulau Panjang. Centroid dari ellips menunjukkan pusat tingkat kesamaan antar lokasi. Kesamaan simbol dan warna menunjukkan kelompok unit sampling dari musim yang sama.



Model partisi geometrik pada ruang euclidean menunjukkan posisi relatif sentroid keanekaragaman beta ( $\beta$ -diversity) komunitas makroinvertebrata pada Monsun Timur Laut berbeda terhadap ketiga periode sampling lainnya. Sementara itu, komposisi dan struktur komunitas lamun pada saat Transisi 1, Monsun Barat Daya dan Transisi 2 memiliki sentroid dan pola dispersi yang sama. Dispersi komposisi dan struktur komunitas makroinvertebrata pada saat Monsun Timur Laut menunjukkan posisi yang relatif lebih berjarak terhadap sentroid musim lainnya. Nilai stress dari plot NMDS analisis PERMANOVA mendekati 0 (0.171). Nilai tersebut menunjukkan tingkat kehandalan model yang mendekati sempurna dalam menjelaskan dinamika  $\beta$ -diversity makroinvertebrata antar musim. Rincian skor analisis tersedia pada lampiran 13.

### 5.8 Respon Komunitas Terhadap Dinamika Monsunal

Dinamika antar musim sebagaimana diuraikan sebelumnya mengindikasikan adanya pengaruh faktor fisik kimia lingkungan yang direspon oleh komunitas lamun dan makroinvertebrata. Sub-bab ini menguraikan pasangan faktor dan respon yang saling terkait dari kedua komunitas terhadap fluktuasi musiman yang terjadi pada lingkungan. Pendekatan yang digunakan dalam menguraikan respon komunitas dalam hal ini adalah *Canonical Correspondence Analysis* (CCA) (Ter Braak 1986).

Analisis korespondensi kanonik (CCA) merupakan metode analisis multivariat ekologi untuk menjelaskan hubungan komposisi komunitas dengan lingkungannya dengan teknik plot eigenvector (Braak 2011; Ter Braak 1986, 2002; ter Braak and Verdonschot 1995; Legendre 2018a, 2018b; Legendre and Anderson 1999; Legendre and Legendre 2003, 2012). Metode ini dirancang untuk mengekstrak gradien lingkungan sintetis dari sekumpulan data ekologis dimana posisi taksa tertentu berkorespondensi dengan gradient lingkungan dalam skala eigen (baik *eigenvalue* maupun *eigenvector*).



### 5.8.1 Respon Komunitas Lamun

Pertumbuhan vegetasi lamun dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi dan kondisi fisik kimia pada habitatnya baik pada sedimen maupun kolom air (Brodersen et al. 2015; Christianen et al. 2011; Erftemeijer and Middelburg 1993; Evrard et al. 2005; van Katwijk, M. E W van der Welle, et al. 2011; Maxwell et al. 2017; Romero et al. 2006; Vonk, Middelburg, et al. 2008). Analisis CCA dari empat periode sampling menunjukkan bahwa jenis-jenis vegetasi lamun dan stasiun pengamatan di Pulau Panjang mengelilingi pusat gradien variabel lingkungan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pertumbuhan optimum lamun membutuhkan ketersediaan semua nutrisi (N dan P) yang mencukupi pada kolom dan sedimen. Overlapping jenis lamun pada perpotongan axis (sumbu) menggambarkan konsentrasi taksa yang membutuhkan kesemua faktor lingkungan secara proporsional. Garis *eigenvector* gradien lingkungan yang pendek menunjukkan bahwasanya tidak terdapat kecenderungan arah dan dominasi yang mencolok dari satu variabel tertentu. Hal tersebut juga mengkonfirmasi kondisi kesetimbangan dinamika nutrisi lingkungan yang bersifat oligotrofik.







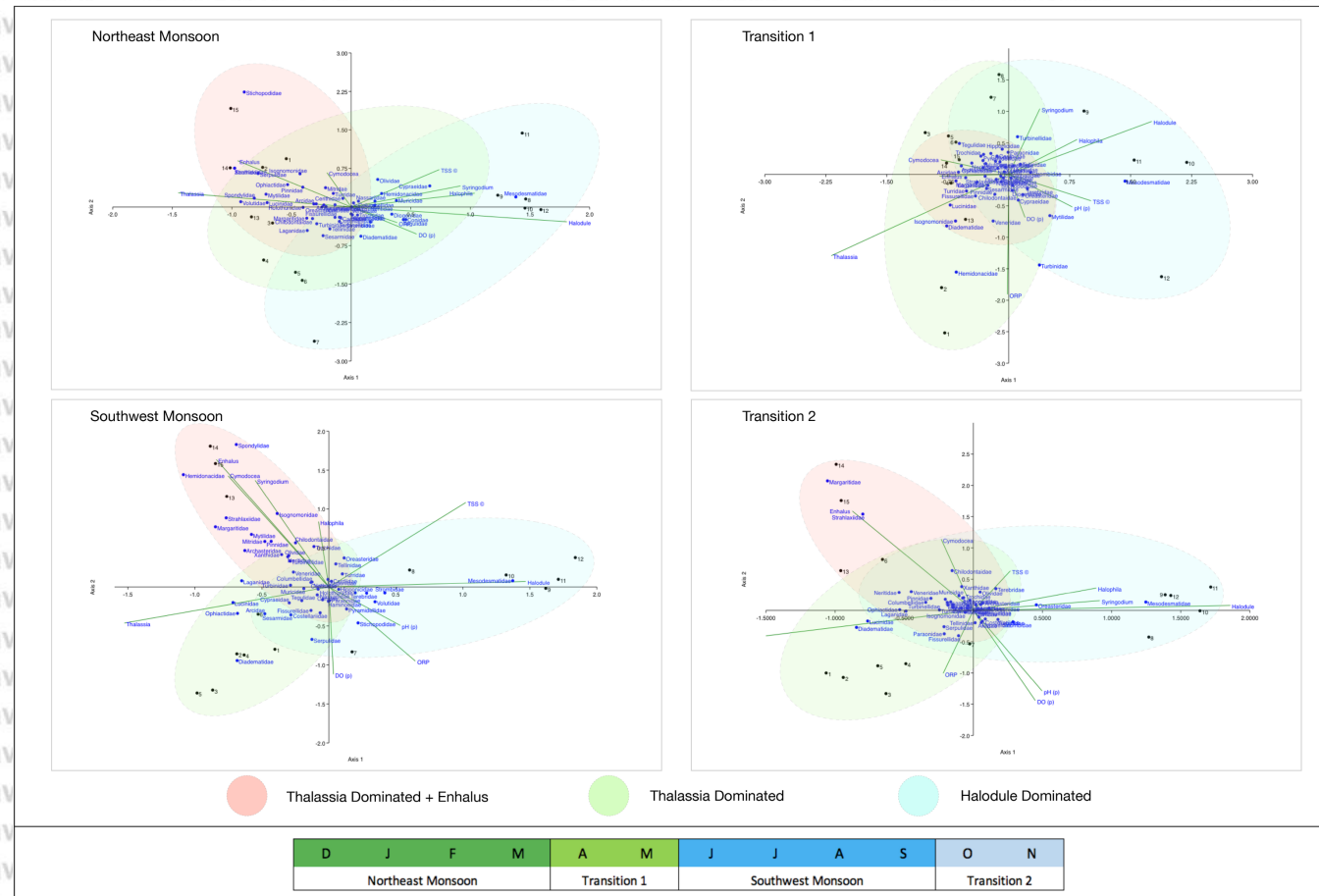
Jenis lamun *E. acoroides* yang ditemukan terbatas pada 3 stasiun (13, 14 dan 15) secara konsisten menunjukkan asosiasi dengan  $[\text{NO}_3\text{-N}_{\text{columnwater}}]$  kolom yang lebih tinggi. *T. hemprichii* konsisten berdekatan dengan arah peningkatan potensial reduksi oksidasi (ORP) dan  $[\text{PO}_{4\text{porewater}}]$ . Posisi *H. uninervis* menggambarkan kemampuan adaptasi dan respon positif terhadap fluktuasi berbagai variabel secara simultan.

Pada saat Monsun Barat Daya (*Southwest Monsoon*) terlihat adanya pergeseran posisi relatif dari zona dominan *H. uninervis* terhadap dua zona lainnya. *Halodule uninervis* menunjukkan respon keterkaitan yang kuat terhadap variabel lingkungan antara lain; Potensial Reduksi Oksidasi (ORP),  $[\text{NO}_3\text{-N}_{\text{porewater}}]$  dan  $[\text{PO}_{4\text{porewater}}]$ . Sebagaimana ditunjukkan sebelumnya (gambar 3 & 4) bahwa terjadi penurunan kerapatan dan tutupan pada zona yang didominasi *H. uninervis* (stasiun 6-12). Lamun memiliki kemampuan untuk menyerap nutrient baik dari akar maupun melalui daun. Model CCA mengindikasikan adanya resistensi dan resiliensi dari *H. uninervis* untuk memulihkan kondisinya dengan cara mengoptimalkan *uptake* nutrien oleh akar dari sedimen dibanding menyerap dari kolom air melalui daun.

### 5.8.2 Respon Komunitas Makroinvertebrata

Keberadaan makroinvertebrata selain didukung oleh kompleksitas struktur habitat yang dibentuk oleh vegetasi lamun, juga oleh ketersediaan kandungan bahan kimia perairan sebagai layanan ekosistem padang lamun (Kneer, Asmus, and Arie 2008; Kneer, Asmus, and Jompa 2013; Rattanachot and Prathep 2016; York et al. 2018). Diagram CCA dari keempat periode sampling menunjukkan bahwa sebaran jenis dan stasiun mengelilingi pusat gradient variabel lingkungan. Pusat *axis* menggambarkan konsentrasi taksa makroinvertebrata di padang lamun. *Overlapping* di sekitar pusat *axis* menunjukkan pusat keanekaragaman jenis makroinvertebrata.





Gambar 54. Diagram CCA menunjukkan kecenderungan respon simultan komunitas makroinvertebrata terhadap gradien variabel lingkungan pada kedua monsun dan kedua periode peralihan. Titik hitam mewakili posisi stasiun, titik biru merepresentasikan posisi pusat kelimpahan vegetasi, garis mewakili variabel lingkungan dengan arah perpanjangan garis menunjukkan arah peningkatannya dalam skala eigen.



Jenis-jenis Pinnidae (*Bivalvia*, *non-mobile epifauna*) dan Strahlaxiidae (*Crustacea*, burrowing shrimp) merupakan makroinvertebrata penciri pada stasiun 13, 14 dan 15. Ketiga stasiun dicirikan oleh jenis lamun dengan tutupan kanopi yang sedang hingga tinggi oleh dominasi *T. hemprichii* dan keberadaan *E. acoroides*. Hidrodinamika cenderung tenang dengan substrat sedikit lebih halus dibandingkan stasiun lainnya dan mendukung perlekatan larva terhadap substrat. Asosiasi serupa ditunjukkan pula oleh *Pinna nobilis* dan lamun *Posidonia oceanica* di perairan Mediterania (Hendriks et al. 2011). Hendriks et al., (2011) menjelaskan bahwa keberadaan *P. oceanica* mereduksi drag forces akibat pergerakan air (arus) yang diterima oleh cangkang *Pinna nobilis* sehingga memfasilitasi pertumbuhan optimalnya. Pola demikian juga yang menjelaskan tingginya kelimpahan *Pinna bicolor* pada stasiun 13 – 15 dimana keberadaan *E. acoroides* mereduksi hidrodinamika arus dan gelombang yang memfasilitasi pertumbuhan jenis makroinvertebrata tersebut.

Sebaliknya, kerang raksasa (Kima) jenis *Hippopus hippopus* (Cardiidae, *Bivalvia*) ditemukan terdistribusi di daerah yang terbuka terhadap pengaruh laut lepas (*exposed*) pada stasiun 6 – 12 dan berasosiasi dengan jenis-jenis lamun dengan kanopi rendah dan terbuka (*H. uninervis*, *S. isoetifolium* dan *H. ovalis*).

Hal ini mengindikasikan larva makroinvertebrata pada wilayah ini transportasi oleh hidrodinamika yang relatif lebih kuat dibanding pada stasiun 13, 14, dan 15.

Kerang raksasa genus *Hippopus* dan *Tridacna* (Cardidae) membutuhkan substrat yang berukuran lebih besar untuk perlekatan bysus serta kanopi yang lebih terbuka agar alga *symbiont* (*zooxanthellae*) pada mantel *Hippopus hippopus* maupun *Tridacna squamosa* dapat berfotosintesis secara optimal.

Sementara itu *Rugulucina vietnamica* (Lucinidae – *Bivalvia*), ditemukan dengan kelimpahan yang sangat tinggi pada daerah yang didominasi oleh *T. hemprichii* (stasiun 1 – 5, 13, 14, dan 15). Menariknya anggota Famili Strombidae



menunjukkan pola asosiasi yang khas dimana *Conomurex luhuanus* cenderung berasosiasi dengan *H. uninervis*, sementara *Canarium urceus* dengan *T. hemprichii*. Bivalvia lainnya yang asosiatif terhadap *H. uninervis* adalah *Atactodea striata* (Mesodesmatidae). Kerang ini dikenal sangat menyukai sedimen kasar dengan hidrodinamika yang tinggi. Kerang ini umum ditemukan seperti sedang bermain dengan cara memunculkan dan menguburkan diri bersamaan dengan gelombang yang datang dan pergi menyapu substrat berpasir. Perilaku ini menyebabkan jenis ini disebut sebagai tude bombang (kerang ombak) oleh masyarakat Sulawesi Selatan.

Makroinvertebrata interstisial (meiofauna) seperti *vexillum* spp (Costellariidae), *Turris babylonia* (Turridae), *Cerithium* spp (Cerithidae), *Rhinoclavis vertagus*, *Pseudovertagus aluco* (Cerithidae) menyebar acak. Menariknya posisi anggota Famili Naticidae dan siput predator secara konsisten berada disekitar pusat axis plot pada keempat musim, hal ini merupakan indikasi kuat mengenai taksa ini aktif berburu beragam jenis siput lain sebagai mangsa.

Tingginya keanekaragaman dan kelimpahan makroinvertebrata khususnya gastropoda dan bivalvia di semua periode siklus monsun juga disebabkan karena pola reproduksi *multivoltine* atau berkali-kali dalam setahun.

Tidak adanya pola reproduksi musiman yang jelas merupakan fenomena jamak pada moluska ekosistem laut tropis hangat dikarenakan rentang perbedaan temperatur antar musim yang sempit (Heryanto and Radjab 2014). Reproduksi alami gastropoda seperti *Rochia nilotica* (Tegulidae) dan *Atactodea striata* (Mesodesmatidae), *Tridacna* spp dan *Hippopus* spp (Cardiidae) seringkali dipicu stress oleh peningkatan suhu lingkungan (Heryanto and Radjab 2014; Yusuf et al. 2006). Yusuf et al., (2006) menambahkan bahwa selain kejut suhu, perlakuan aerasi kuat dan aliran air yang kencang membantu memicu pemijahan pada moluska. Hal yang sama juga memicu pemijahan pada kelompok holothuriidae



(Tuwo and Tresnati 1994, 2015). Dari berbagai pemicu yang disebutkan, Tuwo dan Tresnati (2015) menyatakan bahwa rangsangankejut suhu merupakan pemicu pemijahan paling sukses dalam budidaya. Dengan demikian suhu perairan yang hangat serta sirkulasi hidrodinamika yang baik di Pulau Panjang memfasilitasi makroinvertebrata untuk bereproduksi sepanjang tahun.

Keterkaitan lamun terhadap variabel lingkungan maupun makroinvertebrata terhadap lamun dan variabel lingkungan menunjukkan pola non-linear. Pola non-linear merupakan bentuk respon umum dalam ekosistem dimana semakin banyak element yang terlibat dalam model maka sifat non-linear akan semakin menguat akibat peningkatan kompleksitas respon interaksi antar elemen yang terlibat dalam model. Model telah menunjukkan bahwa semua variabel yang terlibat menunjukkan kondisi tidak setara dari sifat pentingnya. Hal ini dikarenakan analisis CCA membangkitkan gradien sintetik dari kombinasi linear gradien lingkungan yang paling optimal dalam menjelaskan asumsi distribusi taksa sebagai respon terhadap variabel lingkungan (Jamil, Kruk, and Ter Braak 2014).

Model analisis CCA mengeksplorasi *unimodal response (bell shaped)* dari taksa dan variabel yang terlibat dalam model. Respon unimodal merupakan hal yang jamak dalam kajian ekologi dan merupakan turunan dari dua hukum yang terkenal dalam ekologi yakni (1) Hukum Minimum Liebig dan (2) Hukum Toleransi Shelford (Braak 2011; Jamil et al. 2014). Hukum Minimum Liebig menyatakan bahwa pertumbuhan vegetasi tidak ditentukan oleh total sumber daya yang tersedia, tetapi oleh sumber daya dengan tingkat ketersediaan (*bioavailability*) paling langka sebagai faktor pembatas/*limiting factor*. Respon variatif dikarenakan secara alami setiap taksa atau spesies memiliki kebutuhan minimum dari suatu sumberdaya/variabel yang berbeda (Braak 2011). Komplementer dengan hal tersebut, Hukum Toleransi Shelford menyatakan



keberhasilan suatu organisme didasarkan pada sekumpulan kondisi yang kompleks dan bahwa setiap organisme memiliki faktor lingkungan minimum, maksimum, dan optimal yang spesifik atau kombinasi faktor tertentu (Shelford 1931). Sehingga distribusi dan kelimpahan setiap taksa/spesies dibatasi oleh nilai toleransi maksimum yang tidak mungkin untuk dilampaui oleh setiap jenis.

Makroinvertebrata di perairan Pulau Panjang menunjukkan kombinasi kedua hukum ini membentuk niche ekologis (relung ekologi), yaitu wilayah dalam ruang sumberdaya (lingkungan) dimana suatu spesies dapat tumbuh dan berkembang biak dengan optimal. Niche ekologis yang terbentuk sangat kompleks karena adanya perbedaan pada kebutuhan minimum akan suatu variabel di satu sisi dan limit toleransi maksimum antar spesies pada sisi yang lain. Model analisis CCA menunjukkan makroinvertebrata asosiatif padang lamun Pulau Panjang terdistribusi di sekitar center axis. Pusat axis merupakan titik atau zona overlapping variabel lingkungan yang optimal dan menjadi pusat relung ekologi yang mendukung kehidupan dan menghasilkan respons unimodal komunitas makroinvertebrata (Braak 2011; Jamil et al. 2014).

### **5.9 Resistensi Dan Resiliensi Ekosistem**

Niche ekologis yang terbentuk oleh kebutuhan minimum dan batasan toleransi maksimum bersifat spesies spesifik. Secara kumulatif niche ekologis merupakan kunci kekuatan respon komunitas terhadap fluktuasi kondisi atau tekanan di lingkungan. Kompleksitas niche secara akumulatif merupakan penentu resistensi (daya tahan komunitas terhadap suatu gangguan fisik kimia) dan resiliensi (daya pulih setelah mengalami suatu bentuk tekanan).

Gangguan/cekaman yang sifatnya musiman dalam suatu bentang ekosistem laut dalam hal ini padang lamun akan direspon dan dinetralisir oleh taksa yang spesifik yang memiliki kemampuan untuk beradaptasi atau memiliki toleransi tinggi terhadap gangguan tersebut. Dengan demikian dampak yang diterima oleh

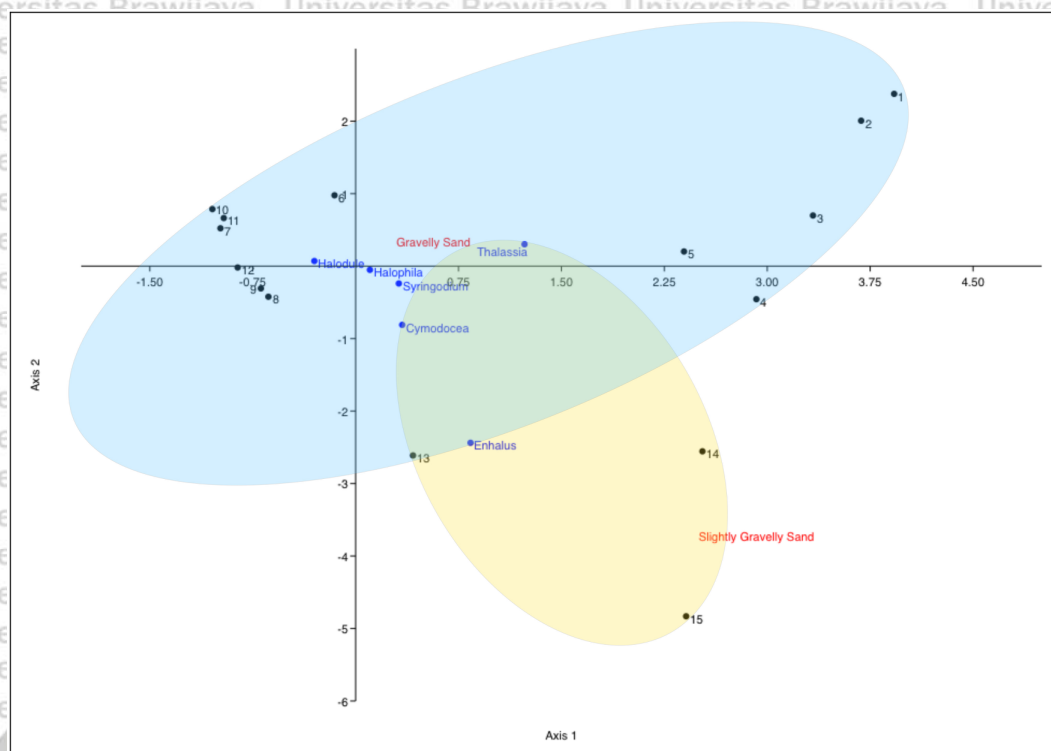


organisme lainnya pada ekosistem yang sama merupakan gangguan yang telah mengalami atenuasi/pelemahan magnitude gangguan atau berada dalam kisaran toleransinya. Dari sisi jumlah, semakin banyak (jumlah jenis dan kelimpahan) organisme yang merespon/menanggung beban, semakin tinggi resistensi dan resiliensi komunitas.

### 5.9.1 Adaptabilitas Terhadap Dinamika *Monsoonal Wave Climate*

Karakter *Monsoonal Wave Climate* dari hidrodinamika perairan menyebabkan padang lamun di Pulau Panjang mengalami gangguan fisik cukup intens yang ditandai dengan peningkatan tinggi gelombang pada Monsun Timur Laut (DJF) dan Monsun Barat Daya (JJA). Gerak gelombang memberikan gangguan terhadap ekosistem padang lamun melalui mekanisme pengadukan kolom air yang memicu tarikan dan regangan pada bilah daun. Sedangkan pada gerak osilasi ombak secara bertingkat kedasar memicu gerusan pada sedimen. Gerusan merupakan akibat peningkatan *Shear Stress*. *Shear stress* merupakan ukuran gaya akibat gesekan aliran air terhadap permukaan yang dilaluinya. Ketika *drag force* dari massa air yang bergerak melintasi sedimen lebih besar dibandingkan Gaya Gravitasi yang menahan sedimen, maka sedimen mulai tergerus oleh air. Dengan demikian kekuatan ini dapat menyebabkan kerusakan pada bilah daun hingga tercabutnya lamun akibat gerusan gelombang (Lanuru et al. 2018).

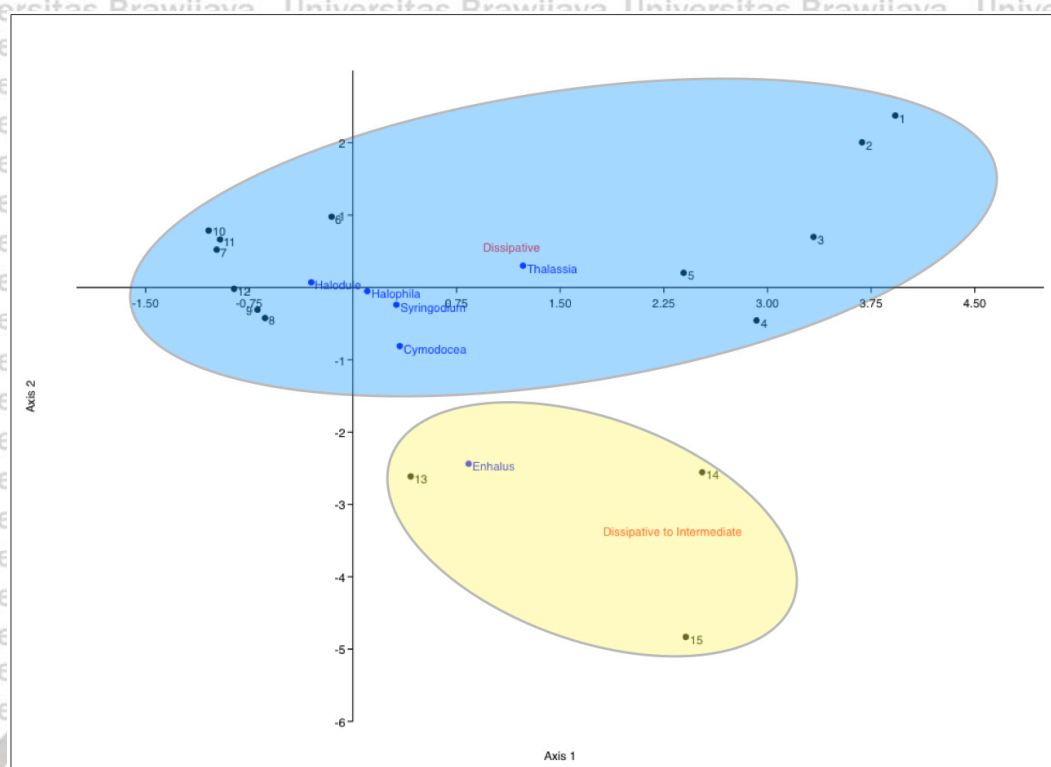




Gambar 55. Plot Korespondensi Kanonis menunjukkan kecenderungan respon simultan vegetasi lamun terhadap tekstur sedimen (titik hitam menunjukkan stasiun; titik biru menunjukkan jenis lamun).

Sedimen merupakan proksi jangka panjang dari proses hidrodinamika perairan (Blott and Pye 2001, 2012). Karakteristik butir sedimen juga merupakan akumulasi proses litoral pembentuk pantai. Analisis tekstur sedimen mengkonfirmasi bahwa perairan Pulau Panjang terbagi atas daerah dengan karakter energi hidrodinamik yang tinggi (stasiun 1 – 12) hingga sedang (stasiun 13 – 15). Demikian pula karakter morfodinamika pantai menunjukkan tipe disipatif/terbuka terhadap energi laut lepas (stasiun 1 – 12) dan peralihan dari disipatif yang tidak sepenuhnya terlindungi dari pengaruh laut lepas (stasiun 13 – 15) (Gambar 42, 43 dan 56).





Gambar 56. Plot Korespondensi Kanonis menunjukkan kecenderungan respon simultan vegetasi lamun terhadap gradien morfodinamika pantai (titik hitam menunjukkan stasiun; titik biru menunjukkan jenis lamun).

Kondisi kesetimbangan yang dinamis proses dan laju/kecepatan deposisi juga dikonfirmasi oleh Diagram Stewart (gambar 39) yang menunjukkan bahwa lingkungan pengendapan (*sedimentary environment*) di sekitar reef flat Pulau Panjang termasuk dalam kategori proses *inner shelf*. Sementara itu sedimen (baik sedimen pantai, laut dalam, maupun daratan) yang dipicu oleh gelombang tsunami tersebar secara acak pada plot menunjukkan empat jenis *sedimentary environment* lingkungan pengendapan. Hal tersebut sebagaimana ditunjukkan oleh sedimen pasca gempa dan tsunami tohoku jepang 2011 (Jagodziński et al. 2012) serta sedimen dari gempa dan tsunami aceh 2004 (Nugroho and Putra 2019). Sumber asal deposit sedimen akibat gelombang tsunami terangkut oleh proses yang kompleks. Sedimen akibat tsunami terangkut seketika oleh energi

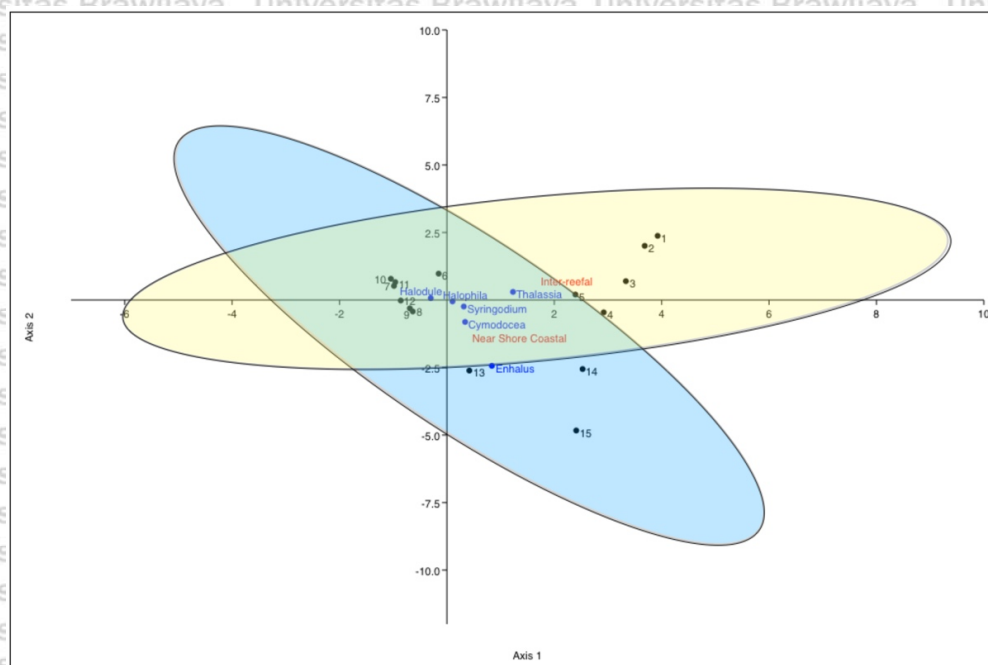


gelombang tsunami yang kemudian segera diikuti proses deposisi di waktu bersamaan (Jagodziński et al. 2012; Nugroho and Putra 2019).

Stabilitas sedimen reef flat Pulau Panjang juga dipengaruhi oleh adaptabilitas lamun terhadap hidrodinamika perairan. Lanuru et al. (2018) menjelaskan mekanisme modifikasi hidrodinamika lingkungan sekitarnya oleh vegetasi padang lamun melalui (1) atenuasi kecepatan arus dan disipasi energi gelombang, sehingga berefek pada retensi sedimen, (2) mengubah profil kecepatan arus sehingga terbentuk stratifikasi profil arus secara vertikal dimana semakin dekat dengan dasar perairan viskositas aliran meningkat yang mengakibatkan penurunan kecepatan aliran air, (3) peningkatan atau penurunan turbulensi (4) kelenturan “propagasi monamis” atau gerak daun seiring gelombang (Lanuru et al. 2018).

Adaptabilitas ekosistem padang lamun dalam mengatasi gangguan gelombang bervariasi berdasarkan jenis, kepadatan tegakan, biomassa, luas/ukuran daun (Lanuru et al. 2018). Dalam hal ini meskipun *Halodule uninervis* memiliki morfologi dan SLA yang lebih kecil dibanding *Thalassia hemprichii* dan *Enhalus acoroides*, tingkat kerapatannya yang tinggi menjadi kunci ketahanan terhadap hidrodinamika gelombang. Tingkat kepadatan tegakan pada biomassa bagian atas berbanding lurus dengan kompleksitas rambatan rhizom. Sinergi keduanya membantu konsolidasi struktur tegakan dalam mempertahankan sedimen terhadap pengaruh gelombang. Dengan demikian selama sistem perakaran (*belowground biomass*) mampu mempertahankan fungsi fisiologisnya dalam menyerap dan mentransfer nutrisi, maka sustainabilitas regenerasi biomassa bagian daun (*aboveground biomass*) dapat terjamin sehingga fungsi ekologisnya tetap terjaga.





Gambar 57. Plot korespondensi kanonik menunjukkan kecenderungan respon simultan vegetasi lamun terhadap gradien pengaruh daratan (titik hitam menunjukkan stasiun; titik biru menunjukkan jenis lamun).

Keberadaan Pulau Panjang dalam asumsi awal setting model diharapkan memberikan pengaruh fisik yang solid terhadap respon komunitas lamun. Dalam hal ini stasiun-stasiun yang berdekatan dengan daratan Pulau Panjang (Stasiun 6, 7, 8, 13, 14, dan 15) dikategorikan *Near Shore Coastal* (berdekatan dengan daratan), sementara selebihnya yang jauh dari daratan (stasiun 1- 5, 9 – 12) dikategorikan *Inter-reefal* (didominasi pengaruh laut). Menariknya plot model korespondensi kanonik dari jenis lamun dan sebaran stasiun sampling menunjukkan adanya overlapping pada beberapa stasiun (Gambar 58). Hal ini mengisyaratkan bahwa pengelompokan secara fisik (berdasarkan kedekatan jarak terhadap daratan pulau) tidak memunculkan respon biologis dan kimiawi yang memiliki batasan yang tegas dan kaku secara spasial. Sehingga terdapat proses lain yang implikasi lanjut dari pengaruh daratan disatu sisi terhadap pengaruh lautan pada sisi yang lain sebagai respon atau proses ekologis yang bekerja pada sistem.



### 5.9.2 Adaptabilitas Terhadap Variabilitas Kimiawi Perairan

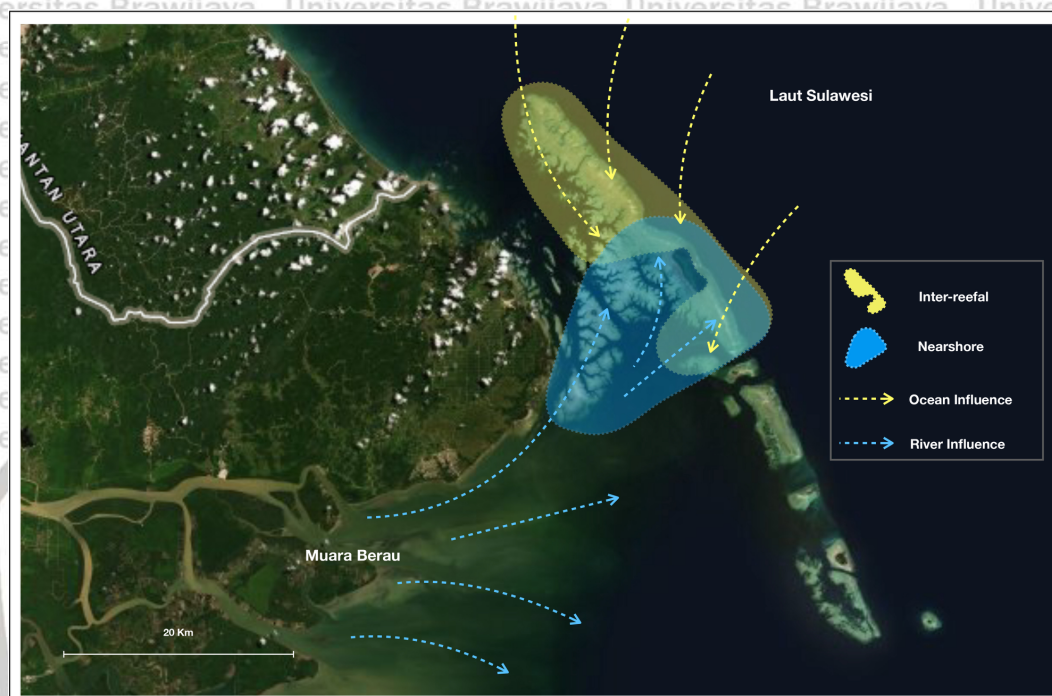
Dinamika kondisi fisik perairan yang berasosiasi dengan siklus musonal turut memberikan pengaruh kepada dinamika kimiawi perairan. Hal ini disebabkan karena laju dan arah reaksi kimia di sistem perairan ditentukan oleh kondisi variabel fisik lingkungannya. Sebagai contoh, penurunan kelarutan oksigen berhubungan peningkatan temperatur. Demikian pula sistem *buffer* pH perairan cenderung bergeser ke kondisi pengasaman yang ditengarai akibat peningkatan  $\text{CO}_2$  di kolom air melalui proses difusi dari udara. Kedua situasi tersebut terjadi pada periode pengambilan sampel Monsun Barat Daya di Akhir Agustus – Awal September 2019 (Tabel 15, Gambar 44 dan 45).

Nitrogen dan Fosfor merupakan nutrien mayor di perairan yang tergolong non konservatif (keberadaannya tidak mengikuti hukum proporsi konstan, konsentrasinya bervariasi, reaktif secara kimiawi dan biologis). Kedua nutrien ini (dalam bentuk  $\text{NO}_3\text{-N}$  dan  $\text{PO}_4$ ) baik pada kolom perairan maupun sedimen memperlihatkan kecenderungan stabilitas yang dinamis antar musim di Pulau Panjang. Hal ini mengindikasikan stabilitas flux/siklus nutrien di Padang Lamun. Sementara itu kestabilan kimiawi perairan ditunjukkan oleh stabilitas salinitas antar musim (ion konservatif) sebagai prasyarat berlangsungnya proses biologis organisme yang terlibat dalam siklus nutrien di ekosistem.

Adanya zona overlapping antara pengaruh daratan (*Nearshore Coastal*) dan lautan (*Inter-reefal*) mengindikasikan adanya proses ekologis fisik-kimia lain yang memiliki pengaruh besar terhadap dinamika ekosistem padang lamun di Pulau Panjang. Temuan ini mengkonfirmasi adanya pengaruh sungai terhadap ekosistem lamun dan karang yang menjadi dasar pembagian zona perairan Kepulauan Derawan berdasarkan jarak dari mulut sungai yang diusulkan oleh Van Katwijk et al. (2011). Interaksi Sungai dan Laut membentuk zonasi gradien pengaruh antara sungai dan laut. Pengaruh laut terhadap sungai dicirikan



dengan stratifikasi horizontal salinitas yang menurun antara laut, muara, dan *tidal junction* (batas pengaruh pasang surut tertinggi di dalam sungai). Sebaliknya pengaruh sungai terhadap laut dicirikan adanya kekeruhan yang merepresentasi angkutan suspensi sedimen dari sungai (*tidal junction*) menuju laut.



Gambar 58. Model sebaran spasial dari zona dominan pengaruh daratan/sungai dan zona dominan pengaruh laut yang saling tumpang tindih di perairan Pulau Panjang berdasarkan diagram Canonical Correspondence Analysis (CCA) pada gambar 58.

Menariknya, temuan Buschmann et al. (2012) mengenai dinamika pasut di estuari Sungai Berau menunjukkan bahwasanya *suspended sediment load* dimodulasi oleh pasang surut. Rerata kecepatan aliran lebih tinggi ketika *spring tide* (pasang puncak) dibandingkan pada saat pasang perbani. Hal ini memicu peningkatan *shear stress* di dasar sungai dan menyebabkan tingkat resuspensi lebih tinggi dibandingkan dengan deposisi. Dengan demikian konsentrasi sedimen (*bed load transport*) saat pasang purnama lebih tinggi dibanding pasang perbani. Konsekuensinya, *suspended sediment* yang terangkut oleh proses aliran subtidal ke laut secara umum lebih tinggi dibanding pasang perbani. Sementara



itu dinamika musiman *plume* muara Sungai Berau menunjukkan bahwasanya angin selatan pada periode JJA mendorong *plume* ke arah utara dan menyebabkan stratifikasi pada kolom air di sebelah utara *Berau Continental Shelf* (Pulau Panjang) (Tarya et al. 2015). Sebaliknya Angin Utara pada periode DJF menyebarkan *plume* ke arah selatan menyebabkan pencampuran sempurna pada kolom air.

Pencampuran sempurna (*Well-mixed Water Column*) terbentuk saat Monsun Timur Laut (DJF) dikarenakan massa air terdesak ke perairan dangkal oleh hembusan angin dan tertahan daratan dan bertemu dengan massa air dari Sungai Berau. Sebaliknya stratifikasi kolom air (*stratified water column*) yang terbentuk di sekitar pulau panjang dikarenakan adanya pengaruh Laut Sulawesi yang dominan di sekitar Pulau Panjang. Dengan demikian temuan penelitian ini menunjukkan bahwa Model Ekologi Numerik dapat disandingkan dengan Model Oseanografi Fisis untuk memberikan perspektif komplementer sehingga terbentuk pemahaman yang lebih komprehensif mengenai dinamika fisik kimia oseanografi berkelindan (integrasi) dengan respon bio-ekologis pada tingkat populasi, komunitas atau ekosistem.

### 5.9.3 Asoosiasi dan Afinitas Spesies Ekosistem Padang Lamun

Lamun merupakan tumbuhan berbunga (*Angiospermae*) yang seluruh siklus hidupnya berlangsung di laut. Reproduksi seksual lamun melalui polinasi (penyerbukan) dan germinasi (perkecambahan), sedangkan secara aseksual melalui tunas yang mengiringi perkembangan rhizoma dan akar. Guna mendukung eksistensi dan sustainabilitasnya di laut lamun di bekali fitur adaptasi terhadap lingkungan perairan yang lengkap dan kompleks. Salah satu diantara bentuk adaptasi lamun yang penting dalam hal ini adalah kemampuannya untuk mendapatkan semua sumberdaya fundamental ( $\text{CO}_2$ , makro-nutrien, mikro-



nutrien, dan metabolisme  $H_2O$ ) secara langsung baik dari kolom air maupun sedimen (Waycott, Biffin, and Les 2018).

Nutrien merupakan segala jenis material yang dibutuhkan organisme untuk memelihara kelangsungan hidup, mendukung pertumbuhan, dan menyediakan energi (Romero et al. 2006). Hampir semua jenis unsur kimia ditemukan pada jaringan (tissue) lamun, 17 diantaranya merupakan unsur esensial yang benar-benar diperlukan bagi kelangsungan hidup, pertumbuhan, dan reproduksi lamun (Romero et al. 2006; Vonk et al. 2017). Unsur C (karbondioksida) N (nitrat), dan Fosfat (P) merupakan makro-nutrien (Romero et al. 2006) sementara selebihnya merupakan mikro-nutrien (Romero et al. 2006; Vonk et al. 2017).

#### 5.9.4 Asosiasi dan Interaksi Intra Jenis Lamun

N dan P merupakan *limiting factor* (faktor pembatas) terhadap pertumbuhan, kerapatan dan distribusi jenis-jenis lamun (Christianen et al. 2013; van Katwijk, M. E.W. van der Welle, et al. 2011; Romero et al. 2006; Vonk et al. 2017; Waycott et al. 2018). Perbedaan kebutuhan minimum dan toleransi jenis-jenis lamun terhadap konsentrasi N dan P menghasilkan zonasi pada ekosistem padang lamun. Zonasi Padang Lamun Pulau Panjang dicirikan oleh dominasi lamun jenis *Thalassia* dan *Halodule* yang merefleksikan respon alamiah jangka panjang dari kedua jenis tersebut terhadap dinamika nutrien.

Distribusi spasial komposisi jenis lamun (gambar 2) menunjukkan adanya zona yang didominasi oleh *Thalassia* (stasiun 1, 2, 3, 4, 14, dan 15), zona dominan *Halodule* (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12), dan zona *ecotone*/peralihan (stasiun 5 dan 13). Zona *ecotone* dengan pada stasiun 5 dan 13 dicirikan oleh (1) peralihan spesies vegetasi yang mencolok, dan (2) perubahan *physiognomy* (tampilan fisik vegetasi lamun) antara *Thalassia* yang berdaun lebar dan berukuran sedang hingga besar dengan *Halodule* yang berukuran kecil. Komposisi jenis pada



stasiun 5 dan 13 merupakan bentuk interpenetrasi dari *T. hemprichii* dan *H. uninervis* yang membentuk ecotone. Pada kedua stasiun pertumbuhan dan ekspansi kedua koloni dominan mencerminkan upaya saling memperluas sekaligus mempertahankan “teritori”.

*T. hemprichii* dan *H. uninervis* merupakan dua genus lamun yang seringkali ditemukan berkoeksistensi pada suatu ekosistem padang lamun. Asosiasi kedua genus sangat erat dan bersifat kompetitif (van Tussenbroek et al. 2006). Kompetisi antara *T. hemprichii* dan *H. uninervis* yang tersebar luas di perairan Indo Pacific (Christianen et al. 2014; Roem 2013a), memiliki pola yang sama dengan *Thalassia testudinum* dan *Halodule wrightii* yang merupakan jenis endemik di perairan tropis Karibia (Armitage, Frankovich, and Fourqurean 2011; Fourqurean 1995, 2014; Fourqurean et al. 1997, 2001; Fourqurean and Rutten 2003; Heithaus et al. 2014; Hernández and Van Tussenbroek 2014; López et al. 2019; van Tussenbroek et al. 2006).

Menariknya, kedua genus tersebut mewakili dua fase suksesi ekologi yang berbeda secara diametral. *Thalassia* mewakili spesies klimaks, sementara *Halodule* merupakan spesies awal/pionir suksesi (Christianen 2013; Fourqurean 2020; López et al. 2019; Roem 2013a; van Tussenbroek et al. 2006). *Halodule* memiliki kisaran toleransi nutrien yang lebih lebar dan memiliki kebutuhan nutrient yang tinggi yang mendukung laju produktifitasnya (Christianen et al. 2011; López et al. 2019; Waycott et al. 2008). Sebaliknya *Thalassia* merupakan spesies klimaks dengan tingkat retensi nutrien yang tinggi pada jaringan daunnya. Kebutuhan relatif nitrogen daun oleh *H. uninervis* mencapai 66 – 84% dari total kebutuhan nitrogen, diikuti oleh *C. rotundata* yang membutuhkan 74 – 82%, dan terendah *T. hemprichii* yang berkisar antara 49 – 58% dari total kebutuhan nitrogennya (Vonk, Middelburg, et al. 2008).



Pada tahap awal suksesi, jenis lamun pionir yang memiliki kisaran toleransi nutrisi lebar dan daya tahan gangguan fisik tinggi seperti *Halodule*, *Syringodium*, dan *Halophila* beserta makroalga *rhizopityc* bertindak sebagai *primary succcessive species* (Fourqurean 2014; Fourqurean et al. 2001; Fourqurean and Rutten 2003; López et al. 2019; van Tussenbroek et al. 2006). Spesies pionir tumbuh cepat mengkoloni dasar perairan, menstabilisasi sedimen, meningkatkan kandungan material organik dan meningkatkan  $[NH_{4porewater}]$  di air pori sedimen. Kondisi ini memungkinkan bagi kehadiran jenis lamun lain termasuk *Thalassia*. Tahap suksesi berikutnya adalah pertumbuhan koloni dan peningkatan kepadatan *Thalassia* secara gradual. Hingga pada titik klimaksnya dimana *Thalassia* menjadi dominan maka  $[NH_{4porewater}]$  kembali menurun. Hal ini disebabkan retensi nutrisi pada bagian biomassa daun mengurangi availabilitas nutrisi di lingkungan pada level di bawah *minimum requirement* dari jenis *Halodule* (Armitage et al. 2011; López et al. 2019).

Suksesi ekologi padang lamun secara alami berlangsung dalam rentang waktu yang panjang serta dapat bersifat positif maupun sebaliknya. Eksperimen Armitage et al. (2011) menunjukkan suksesi padang lamun di Karibia bergeser dari *T. testudinum* menjadi *H. wrightii* akibat penambahan  $PO_4$ . Pada 2 tahun pertama respon *Thalassia* terhadap penambahan  $PO_4$  berupa peningkatan pertumbuhan daun dan tingkat tutupan, setelah 3 tahun *H. wrightii* mulai tampak mengkoloni daerah yang sebelumnya dominan *Thalassia* (Armitage et al. 2011). Dengan demikian komunitas lamun mempengaruhi ketersediaan nutrisi, juga mengubah suplai nutrisi yang mempengaruhi komposisi jenis komunitas. Mekanisme ini mengontrol kesetimbangan populasi kedua jenis (Armitage et al. 2011; López et al. 2019).

Berbeda dengan daerah bermusim empat dimana dominasi satu jenis lamun seringkali membentuk hamparan padang lamun *monospecific* (spesies



tunggal). Dominasi satu jenis tidak lantas menghilangkan keberadaan jenis lain secara mutlak di padang lamun tropis. Komposisi jenis padang lamun tropis pada umumnya terdiri dari campuran 3-4 jenis. *H. ovalis*, *S. isoetifolium* dan *C. rotundata* merupakan jenis yang tumbuh menginterferensi komunitas dominan *T. hemprichii* dan *H. uninervis* di Pulau Panjang. Kehadiran ketiga jenis pionir ini juga dikarenakan kemampuan toleransi yang baik terhadap variabilitas fisik (arus, gelombang, temperatur dan penyinaran matahari) dan kimia (ketersediaan N, P dan pH) di lingkungan. *H. ovalis* tidak hanya ditemukan di bagian tengah zona dominan *T. hemprichii* maupun *H. uninervis* tetapi juga pada area berpasir kasar di tepi reef flat ke arah terumbu karang dan berpasir halus ke arah mangrove di Pulau Panjang. Hal ini dikarenakan *H. ovalis* dapat bertahan pada zona hempasan/surf zone.

Berdasarkan uraian sebelumnya dapat disimpulkan bahwa zonasi spasial komunitas lamun Pulau Panjang terbentuk oleh akumulasi beragam respon fisiologis yang variatif dan bersifat spesies spesifik. *Self spatial arrangement* padang lamun Pulau Panjang merupakan respon kesetimbangan dinamik jangka panjang terhadap variabilitas dan dinamika nutrien akibat pengaruh sungai dan lautan.

Bagaimanapun ketiadaan gradien nutrien yang jelas selama periode sampling menunjukkan kemungkinan adanya *Ecocline* yang sangat tipis. Hal yang sama diisyaratkan pula oleh Van Katwijk et al. (2011) yang menyatakan bahwa parameter Air Kolom dan Pori tidak dapat menjadi indikator dini eutrofikasi pada ekosistem Padang Lamun di Perairan Berau. Sejauh ini pola yang jelas adalah bahwa semakin mendekati sungai sifat ekosistem relatif *N Limiting* sementara bergeser ke laut cenderung *P limitation* yang dicirikan tingginya  $PO_4$  pada sedimen karbonat namun bioavailabilitas rendah (van Katwijk, M. E.W. van der Welle, et al. 2011) dikarenakan sedimen karbonat cenderung



mengadsorpsi P dibanding melepaskannya ke perairan (Erftemeijer and Middelburg 1993; Vonk, Middelburg, et al. 2008). Kapasitas sedimen karbonat dalam mengadsorb  $PO_4$  berhubungan secara langsung dengan komposisi ukuran butir, partikel sedimen karbonat yang lebih kasar memiliki konsentrasi  $[PO_{4\text{porewater}}]$  yang relatif lebih rendah (Erftemeijer and Middelburg 1993).

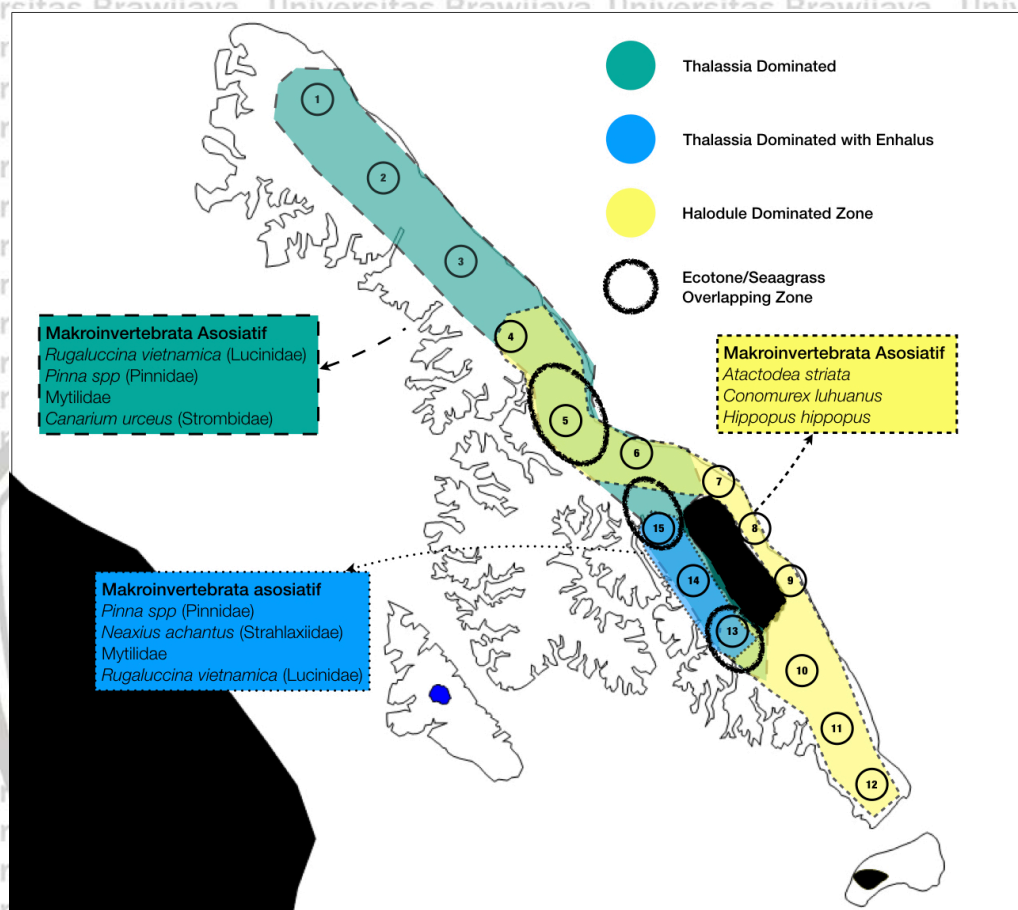
#### 5.9.5 Asosiasi dan Interaksi Intra Makroinvertebrata

Lamun merupakan *foundation species* atau *ecosystem engineers* dikarenakan mereka mampu memodifikasi lingkungannya menjadi habitat yang mendukung kehidupannya dan berbagai biota lain (van der Heide et al. 2012). Habitat yang dibentuknya menjadi lebih baik dalam aspek kompleksitas struktur maupun fungsional ekosistem. Hal ini ditunjukkan dengan kehadiran berbagai jenis biota yang hidup berasosiasi dengan lamun baik makroinvertebrata.

Sebagaimana ditunjukkan hasil analisis CCA pada bagian sebelumnya (Gambar 55) bahwa terdapat kompleksitas pola asosiasi antara komunitas makroinvertebrata terhadap komunitas lamun. Terdapat makroinvertebrata yang menunjukkan keeratan asosiasi terhadap jenis lamun tertentu, sementara terdapat pula kelompok makroinvertebrata lainnya yang sebarannya tidak berkaitan dengan keberadaan atau dominasi jenis lamun tertentu. Demikian pula asosiasi diantara sesama makroinvertebrata tersebut. Sebagai contoh, Lucinidae (Bivalvia) yang melimpah pada daerah yang didominasi *Thalassia hemprichii* atau Strahlaxidae (Crustacea) yang berasosiasi dengan *Enhalus acoroides* menunjukkan eratnya asosiasi. Ada pula asosiasi yang spesifik misalnya *Conomurex luhuanus* (Strombidae) dengan *Halodule uninervis* dan *Canarium urceus* (Strombidae) dengan *Thalassia hemprichii*. Keduanya berasal dari family yang sama namun memiliki preferensi habitat yang berbeda. Adapun jenis-jenis makroinvertebrata yang tidak menunjukkan pola asosiasi khusus dengan lamun, dicirikan oleh kelimpahannya yang rendah dan distribusinya yang random.



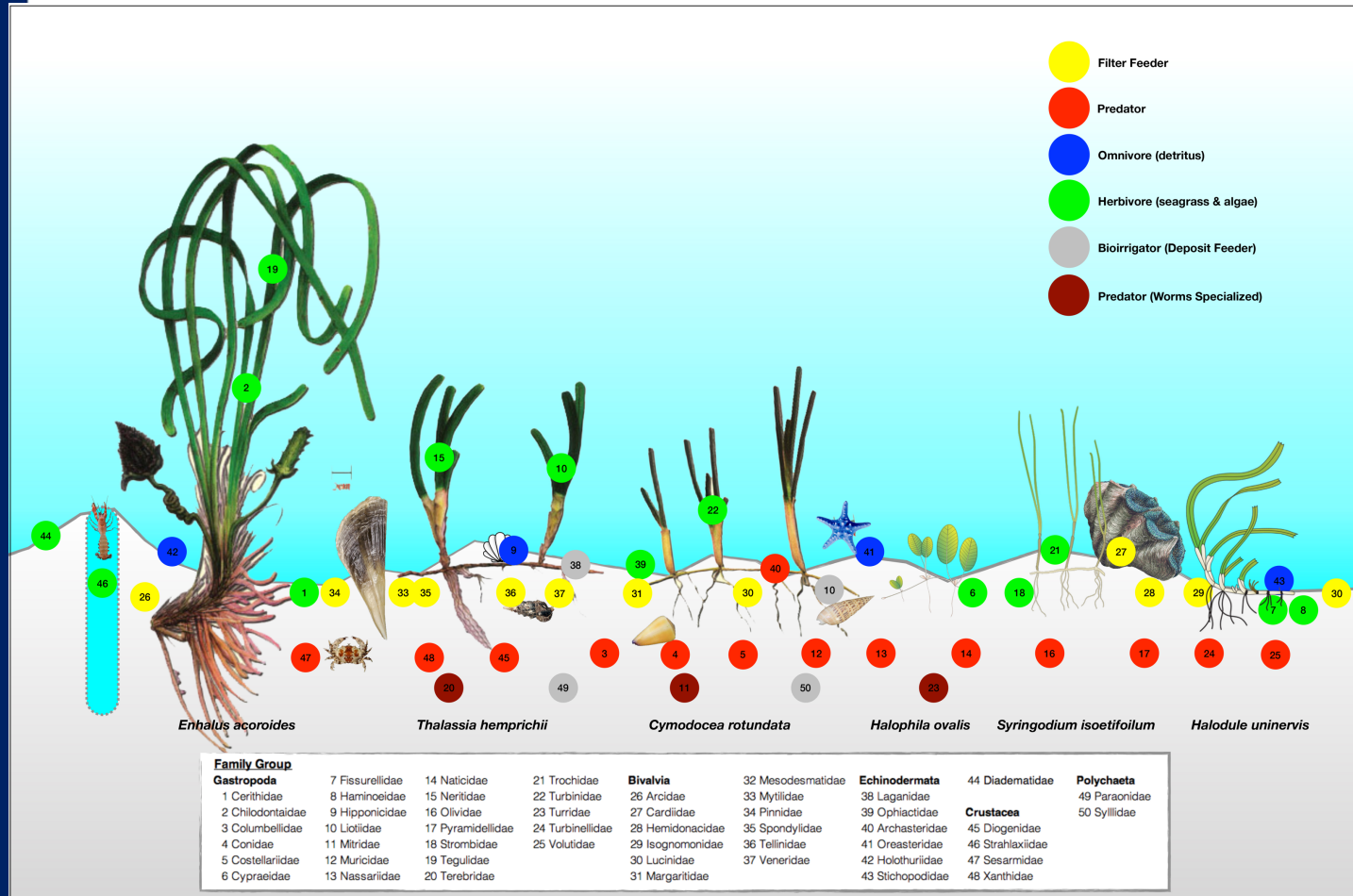
Secara umum kelimpahan dan keanekaragaman makroinvertebrata konsisten relatif tinggi pada stasiun 5, 13, 14, dan 15 yang berbanding lurus dengan tingkat tutupan canopy, komposisi jenis (Gartner et al. 2013; Tuya et al. 2011) dan kerapatan tegakan lamun (Arfiati et al. 2019).



Gambar 59. Model konseptual zonasi vegetasi lamun dan makroinvertebrata yang berasosiasi lamun di Pulau Panjang.

Kompleksitas asosiasi makroinvertebrata ini dipengaruhi oleh diferensiasi toleransi terhadap faktor lingkungan baik fisik maupun kimia serta preferensi kebutuhan biologis berupa makanan, reproduksi maupun perlindungan dari pemangsaan predator. Kompleksitas yang terbentuk pada ekosistem padang lamun Pulau Panjang disederhanakan melalui plot distribusi habitat setiap taksa (Iqbal, Gama, and Yanuwadi 2015) yang dikombinasikan dengan identifikasi peran fungsional ekologis dari setiap famili yang ditemukan.





Gambar 60. Ilustrasi konseptual pola distribusi dan asosiasi komunitas makroinvertebrata padang lamun Pulau Panjang. Warna menunjukkan kelompok fungsional, posisi menunjukkan preferensi habitat sekaligus mengimplikasikan strategi hidup.



Gambar 59 dan 60 memperlihatkan pola distribusi spasial jenis lamun yang diikuti oleh makroinvertebrata asosiatifnya. Hal ini menunjukkan preferensi habitat tertentu dari makroinvertebrata di padang lamun. Bagi invertebrata hal ini secara khusus menunjukkan adanya pola berbagi habitat sumberdaya makanan (foraging area), habitat berlindung, serta habitat reproduksi dan pemijahan.

Keterkaitan makroinvertebrata terhadap lamun maupun makroinvertebrata lainnya membentuk niche ekologi.

Niche yang terbentuk di ekosistem padang lamun Pulau Panjang merupakan hasil kombinasi dari *minimum limiting factor* dan perbedaan toleransi dari seluruh jenis makroinvertebrata yang berkoeksistensi. Dalam hal ini afinitas spesies ditentukan pada bagaimana kemampuan spesies-spesies yang berkoeksistensi tersebut menggunakan sumber daya yang sama dalam komunitas. Selanjutnya distribusi dan kelimpahan suatu taksa diatur oleh kelompok taksa lain yang menempati taraf trofi di atasnya. Melalui jejaring makanan, interaksi antara sesama makroinvertebrata maupun dengan lamun bermuara pada stabilitas ekosistem secara umum. Sebagai contoh, pengendalian pertumbuhan epifit pada lamun yang ditunjukkan oleh *smaragdia rangiana* dan *smaragdia soverbyana* (Neritidae). Sementara kelompok predator (Naticidae, Conidae, Mitridae, dan Terebridae) mengendalikan populasi kelompok lainnya.

Selain melalui mekanisme rantai makanan (aliran energi), aktifitas dan mobilitas makroinvertebrata insterstitial/meiofauna secara langsung berperan memfasilitasi siklus materi (Islami 2015). Makroinvertebrata memicu proses bioturbasi melalui aktifitas ekskavasi (penggalian fisik sedimen), *reworking* (pergerakan biogenik akibat aktifitas bawah permukaan sedimen oleh biota, dan bioirigasi (transport nutrient antara sedimen dan kolom air di atasnya melalui lubang ventilasi sifon gastropoda atau lubang habitat organisme seperti *neaxius*



*achantus* (Strahlaxidae). Kelompok non mobile epifauna seperti kima *Hippopus hippopus* (Arcidae) dan Pinna (Pinnidae) berperan sebagai filter feeder.

Secara umum makroinvertebrata berperan dalam memelihara kesehatan padang lamun melalui aktifitas grazing terhadap alga epifit, penyingkatan siklus materi melalui jalur detrital (Vonk, Middelburg, et al. 2008; Vonk, Christianen, et al. 2008), aktifitas bioturbasi (Burdige 2012) dan berperan sebagai polinator (van Tussenbroek, et al. 2006; Van Tussenbroek et al. 2016; Van Tussenbroek, Monroy-Velazquez, and Solis-Weiss 2012; Waycott et al. 2018).

Sebagai spesies fondasi ekosistem, lamun juga berperan meningkatkan kompleksitas jaring makanan melalui fasilitas non-trofik pada jejaring makanan yang mendiami ekosistem padang lamun (Borst et al. 2018). Fasilitas non-trofik berupa kompleksitas struktur fisik yang menarik kehadiran biota untuk berlindung. Rani, Budimawan dan Ambo-Rappe (2009) melaporkan bahwa struktur lamun artifisial dalam meningkatkan keanekaragaman komunitas ikan, sementara Gartner et al. (2013) melaporkan peningkatan komunitas makroinvertebrata. Meski demikian struktur artifisial memiliki keterbatasan layanan ekologis secara optimum dikarenakan tidak memberikan respon dan layanan fungsi ekologi sebagaimana struktur lamun alami.

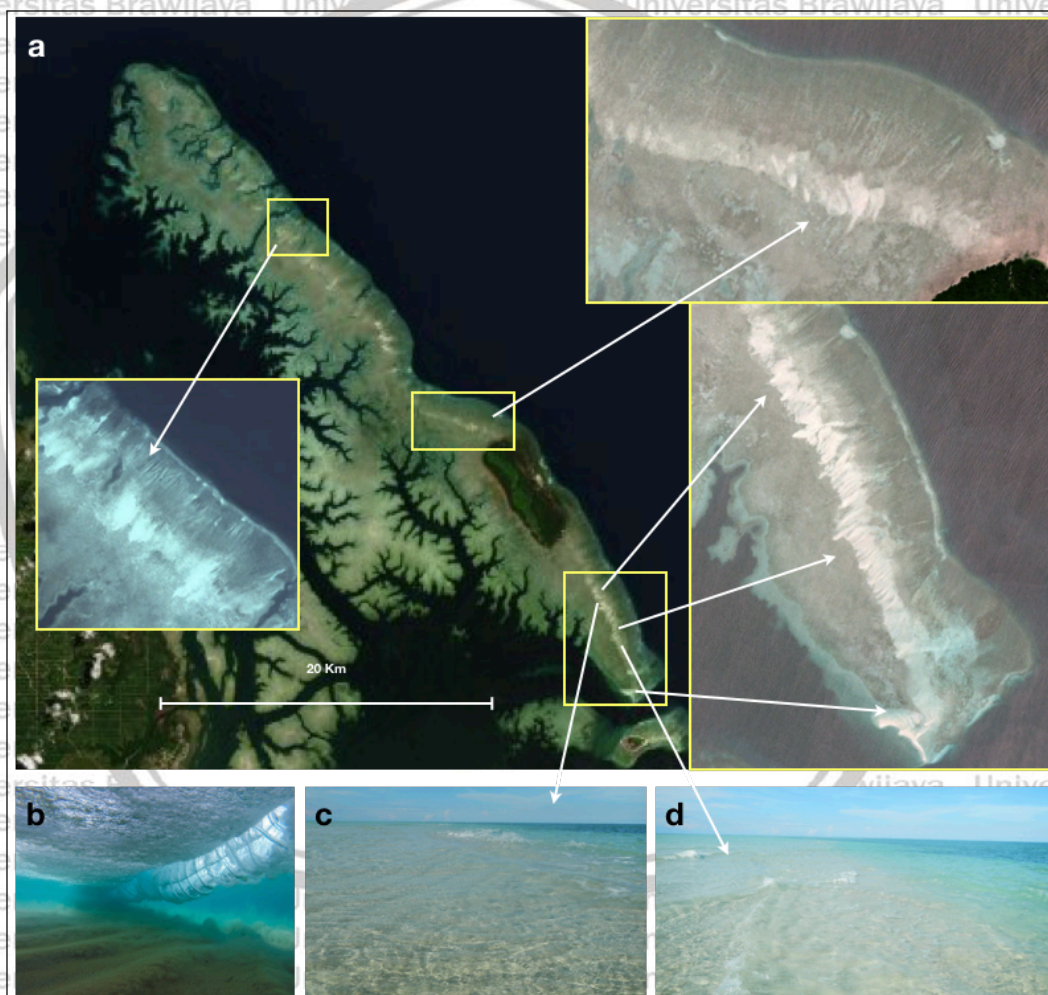
### **5.10 Dinamika Lansekap Ekosistem Padang Lamun Pulau Panjang**

Ekologi lansekap mengkaji interaksi organisme dan lingkungan pada bentang ekosistem yang luas berkaitan dengan struktur, fungsi dan perubahan di sebuah area yang heterogen. Struktur lansekap berkaitan dengan tipe, distribusi, dimensi, dan bentuk komponen penyusun lanskap (Prasetyo 2017).

Ekologi lansekap di daratan melatari kemunculan kajian ekologi seascape (bentang laut) dimana kerangka kerja konseptual dan analitis yang dikembangkan berdasarkan ekologi lansekap darat (Pittman et al. 2018). Meskipun belum ada definisi yang baku mengenai seascape di Indonesia (Siry



2013), namun dapat dipahami bahwasanya delineasi bentang laut dapat berdasarkan pada tingkat kesamaan fitur fisiografi dan konektifitas ekologi kawasan laut pada skala yang luas atau pada kesamaan pola gelombang dan batimetri. Secara spasial kajian lansekap/seascape ekosistem padang lamun berkaitan dengan dinamika pada area dengan kisaran minimum 100 - 1000 m yang disebabkan oleh keseragaman proses hidrodinamika maupun proses skala luas lainnya (Koch et al. 2006).



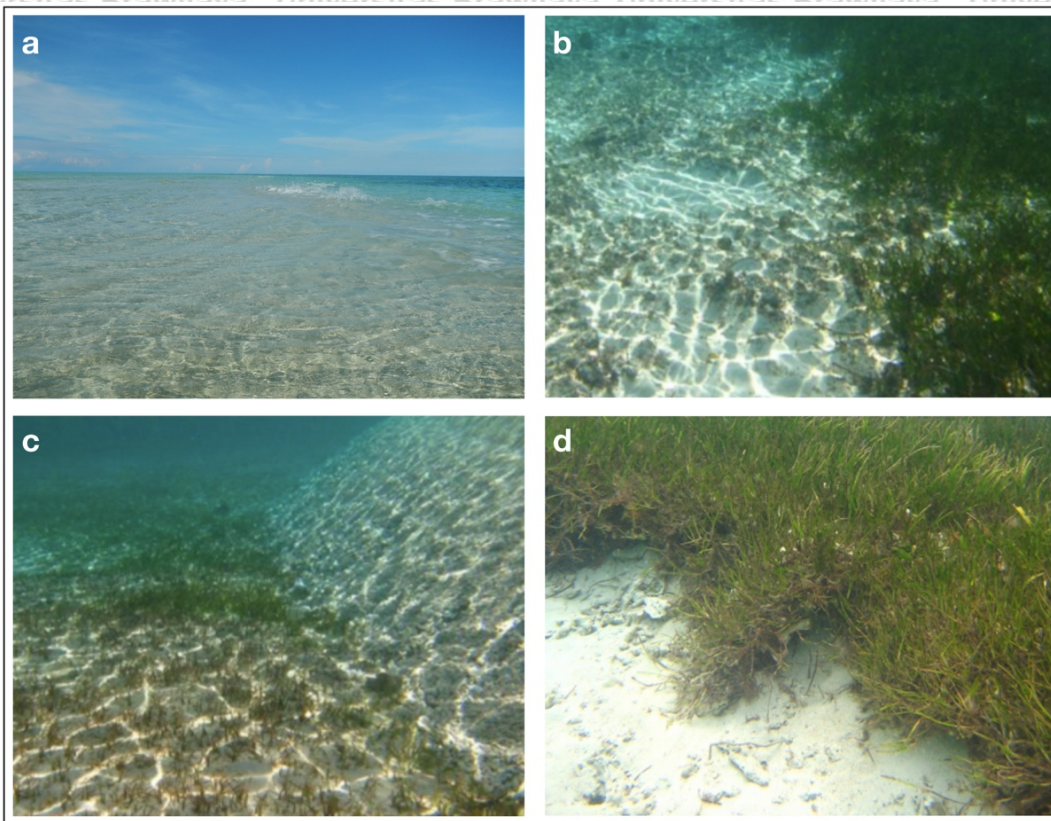
Gambar 61. Sandwave merupakan bentuk *patchiness*/gangguan pada seascape padang lamun. Ukuran dan kontinuitas sandwave mengindikasikan tingginya tingkat energi hidrodinamika yang memindahkan sedimen. Sisi barat Pulau Panjang yang cenderung terlindungi memiliki tutupan kanopi yang tinggi dibanding daerah lainnya. a. Distribusi beberapa area sandwave di reef flat Pulau Panjang, b. ilustrasi turbulensi gelombang menyebabkan pergerakan sedimen, c. dan d. sandwave di sebelah tenggara Pulau panjang



Jejak pengaruh *monsoonal wave climate* (seasonal) dan siklus diurnal pasang surut terekam oleh kondisi lingkungan pengendapan sedimen. Sebagian besar Reef Flat Pulau Panjang yang menjadi habitat lamun terekspose terhadap energi hidrodinamik yang relatif tinggi dari Laut Sulawesi. Kondisi hidrodinamika yang tinggi tersebut dicirikan keberadaan zona pergerakan sedimen permukaan khususnya pasir kasar dan kerikil kecil pada area gumuk pasir (tidak bervegetasi) di sekitar padang lamun. Hal ini disebabkan kontinuitas erosi dan deposisi sedimen.

*Monsoonal wave climate* yang datang berasal dari arah berbeda secara diametral menyebabkan sedimen tertransportasi dari satu sisi punggung gumuk pasir pada Monsun Timur Laut akan dikembalikan kesisi sebaliknya saat Monsun Barat Daya. Pada level bentang laut, fenomena *sand wave* ini menciptakan pola mosaik padang lamun pulau panjang. *Sand wave* merupakan bentuk *Patchiness* atau kebolongan pada hamparan lamun yang mencirikan adanya gangguan pada *seascape* ekosistem. *Patchinees* di padang lamun beragam skala dari kecil sampai besar (*Blowout*). Derajat *Patchinees* ini bergantung pada magnitude (besaran) dan frekuensi gangguan yang terjadi. Dengan demikian semakin ekstrim gangguan maka semakin besar dampak terhadap resistensi dan resiliensi padang lamun.





Gambar 62. Kenampakan fisik seascape Padang Lamun berkaitan dengan hidrodinamika perairan (a) Gumuk pasir, (b) tepi batas luar lamun berdekatan dengan terumbu karang tepi (c) tebing terjal gumuk pasir, (d) blowout.

Diferensiasi bentuk gangguan hidrodinamik disebabkan karena gelombang dan aliran arus yang memasuki reef flat mengalami transformasi baik arah maupun kecepatannya. Gumuk pasir merupakan zona deposisi sedimen akibat berkurangnya kemampuan air memindahkan sedimen secara gradual (Gambar 63 a). Pada bagian tepi dimana kekuatan arus melemah, terbentuk tebing terjal gumuk pasir dibentuk oleh gelombang arus balik turbulen/eddies yang menahan posisi pasir (Gambar 63 c). Diantara padang lamun dan terumbu karang tepi sering kali ditemukan batasan berupa zona pasir kasar. Hal ini merupakan indikator posisi *surf zone* tepat dibelakang zona ombak pecah (*wave break zone*). Jenis lamun yang mampu beradaptasi dengan baik pada zona ini dari genus *Halophila*. Koloni *Halophila* sering ditemukan dengan lebar 1 hingga 2



meter sepanjang sisi luar membentuk sabuk bagi formasi lamun dibelakangnya.

Sabuk koloni halophila merupakan penciri batas tepi seascape pada sisi berhadapan dengan tepian terumbu (Gambar 63 b). *Blowout* disebabkan gerusan gelombang dan arus yang kuat dari satu arah (Gambar 63 d). *Blowout* biasanya terjadi akibat gelombang yang kuat. Berbeda dengan ketiga gambar sebelumnya yang umumnya terbentuk oleh kesetimbangan proses hidrodinamika pantai akibat gelombang lemah yang dicirikan oleh *Lightflex* (pola garis kilau cahaya di dasar perairan akibat pembelokan sudut datang cahaya saat menabrak permukaan air).

Tabel 19. Ringkasan ANOVA kerapatan jenis (tegakan  $m^{-2}$ ) dan tingkat penutupan (%) vegetasi lamun dari 4 musim di Pulau Panjang. Notasi huruf yang berbeda menyatakan perbedaan nyata berdasarkan Uji posthoc Tukey dan *Least Square Difference* pada  $\alpha = 0.05$  ( $n = 60$ ).

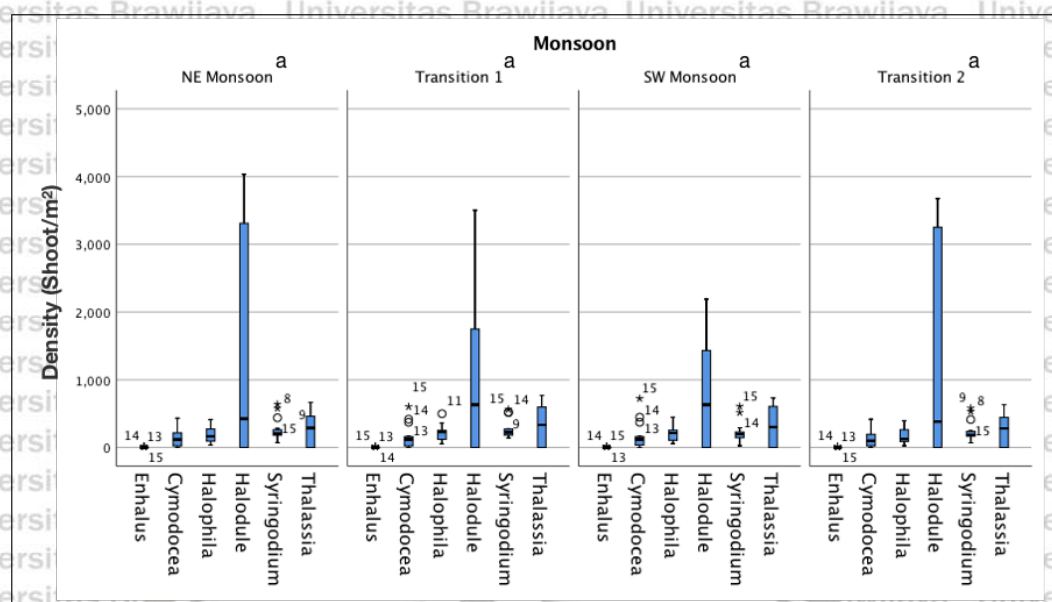
	ANOVA Antar Musim						Homogeneous Subset			
	NE x T1	NE x SW	NE x T2	T1 x SW	T1 x T2	SW x T2	NE	T1	SW	T2
<i>E. acoroides</i>	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
<i>C. rotundata</i>	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
<i>H. ovalis</i>	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
<i>H. uninervis</i>	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
<i>S. isoetifolium</i>	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
<i>T. hemprichii</i>	ts	ts	ts	ts	ts	ts	a	a	a	a
% Cover	*	*	ts	ts	*	ts	a	bc	bc	ca

\*Berbeda Signifikan pada  $\alpha = 0.05$

ts Tidak Terdapat Perbedaan Signifikan

Padang lamun Pulau Panjang menunjukkan kestabilan dinamika tegakan antar musim. Hasil ANOVA menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan dari kerapatan (tegakan  $m^{-2}$ ) antar musim. Sementara itu terdapat perbedaan tingkat tutupan kanopi padang lamun secara signifikan ( $\alpha = 0.05$ ) pada periode transisi 1 dan monsun barat daya. Hal ini berkaitan dengan penurunan tegakan *Halodule uninervis* di kedua musim tersebut meskipun penurunan tidak berbeda signifikan (Gambar 63).





Gambar 63. Perbandingan kerapatan jenis (tegakan/m<sup>2</sup>) lamun. Notasi huruf yang berbeda menyatakan perbedaan nyata berdasarkan Uji posthoc Tukey dan *Least Square Difference* pada  $\alpha = 0.05$ .

Pada level lansekap diketahui dinamika penurunan tingkat tutupan pada akhir musim Transisi I hingga Monsun Barat Daya bersifat parsial. Data dari empat periode pengamatan (Gambar 48) menunjukkan bahwa fluktuasi kerapatan dan tutupan terjadi pada stasiun 6 hingga 12 yang didominasi oleh jenis *H. uninervis*. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa fragmen lansekap padang lamun yang dicirikan dominasi *H. uninervis* tersebut mengalami gangguan. Hal ini menunjukkan bahwa dinamika dan persistensi populasi lamun berbeda antar lokasi dan waktu (Connolly et al. 2018) yang dipengaruhi oleh adaptabilitas spesies dan bentuk spesifik gangguan (Christianen et al. 2013; Connolly 2009; Connolly et al. 2018; van Katwijk, M. E.W. van der Welle, et al. 2011; Lal et al. 2010; López et al. 2019; York et al. 2018). Kilminster et al (2015) menggolongkan *Halodule* sebagai peralihan antara tipe lamun yang bersifat pengkoloni dan oportunistik. Hal ini dikarenakan *Halodule* memiliki karakter respon pemulihan terhadap gangguan yang tinggi, kemampuan regenerasi tegakan daun yang cepat, resistensi fisiologi yang rendah.

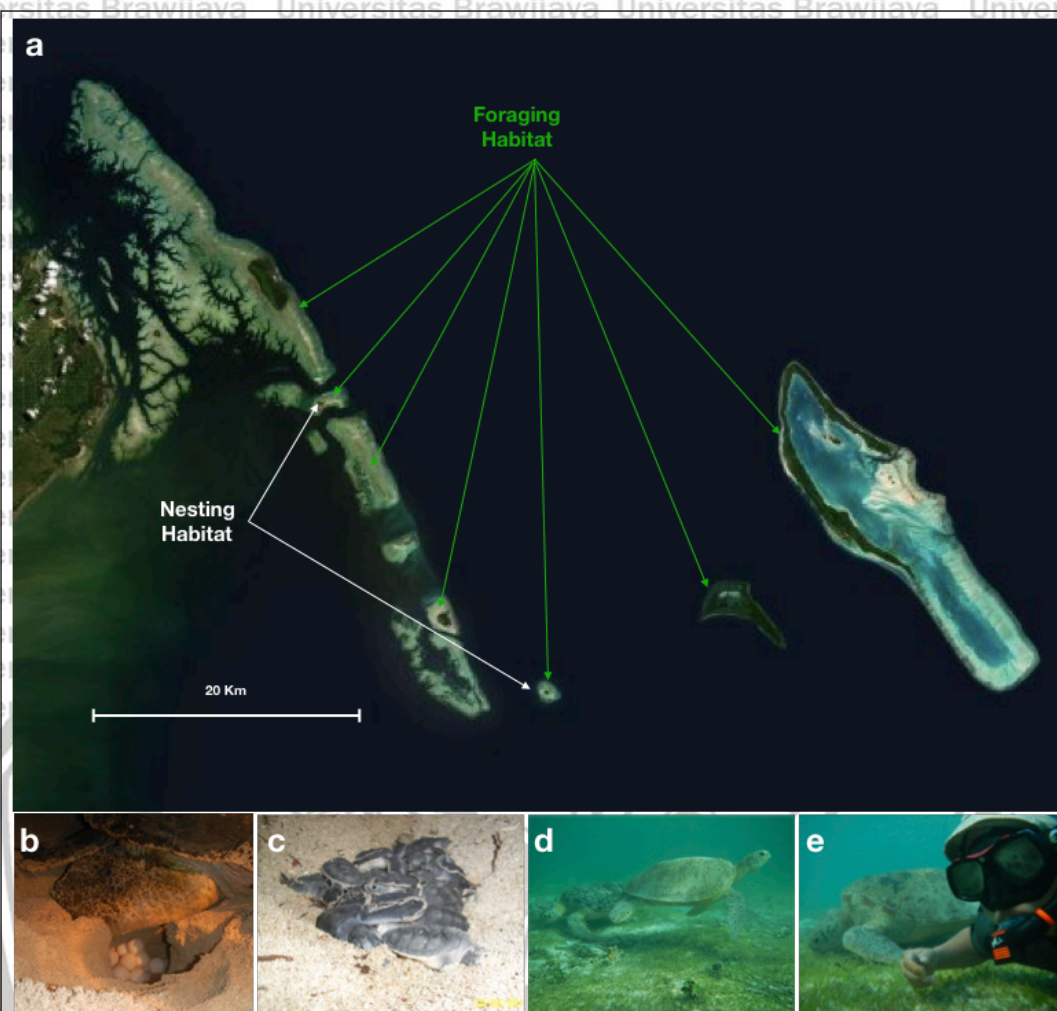


### 5.10.1 Implikasi Seasonal Herbivory Grazing Terhadap Padang Lamun

Pertengahan Monsun Timur Laut (Januari-Februari) merupakan periode kedatangan dari migrasi reproduksi penyu hijau di Kepulauan Derawan. Sebagai kompensasi energi yang hilang selama migrasi jarak jauh dan pemenuhan kebutuhan energi untuk reproduksi, penyu hijau mengkonsumsi lamun jenis *Halodule uninervis* sebagai preferensi pastura utama. Selama periode reproduksi tersebut menyebabkan kebutuhan makanan populasi penyu tekanan terhadap padang lamun sebagai *foraging habitat*. Tekanan terutama terhadap *Halodule uninervis* sebagai preferensi makanan yang tinggi nitrogen, rendah lignin dan sangat mudah dicerna (de Longh et al. 2007). Tekanan overgrazing berlangsung selama periode transisi 1 hingga kedatangan Monsun Barat Daya (April-Agustus). Monsun barat daya memfasilitasi proses “arus balik” migrasi penyu hijau melalui pelemahan kecepatan Arus Lintas Indonesia (Arlindo) pada lapisan dekat permukaan.

Pada musim puncak reproduksi penyu hijau, padang lamun di Kepulauan Derawan mendapatkan tekanan *overgrazing* (perambanan berlebih) oleh penyu hijau (*Chelonia mydas*) (Christianen et al. 2014; Roem 2013a). Fenomena ini merupakan siklus tahunan yang terjadi pada periode migrasi reproduksi penyu antara bulan Februari-Agustus setiap tahunnya dimana puncak kepadatan penyu terjadi antara April-Juni. Christianen et al. (2012) melaporkan bahwa kepadatan penyu mencapai  $15 \pm 2.20 \text{ ind Ha}^{-1}$ , Sementara Roem (2013a) melaporkan kepadatan  $9.25 \pm 3.25 \text{ individu Ha}^{-1}$  telah melampaui 10% daya dukung padang lamun Pulau Derawan (Roem 2013a).





Gambar 64. a. Pola penggunaan habitat internesting Penyu Hijau di Kepulauan Derawan b. aktifitas bertelur/nesting c. tukik yang keluar setelah periode inkubasi (50-60 hari), d. aktifitas reproduksi e. aktifitas makan foraging.

Periode migrasi reproduksi merupakan rentang waktu dimana penyu dari berbagai tempat datang untuk bereproduksi di Kepulauan Derawan. Selama kurun waktu tersebut betina produktif mampu bersarang (bertelur) sebanyak 5 – 6 kali dengan interval waktu 12 – 14 hari. Rentang waktu antar peneluran diisi dengan aktifitas makan dan kawin. Perkawinan terjadi di tepian terumbu yang tenang terutama pada saat surut di siang hari. Selama periode tersebut padang lamun di Kepulauan Derawan terutama di reeflat Pulau Panjang, reeflat Pulau Derawan, reeflat Masimbung, Pulau Kakaban dan Pulau Maratua berperan

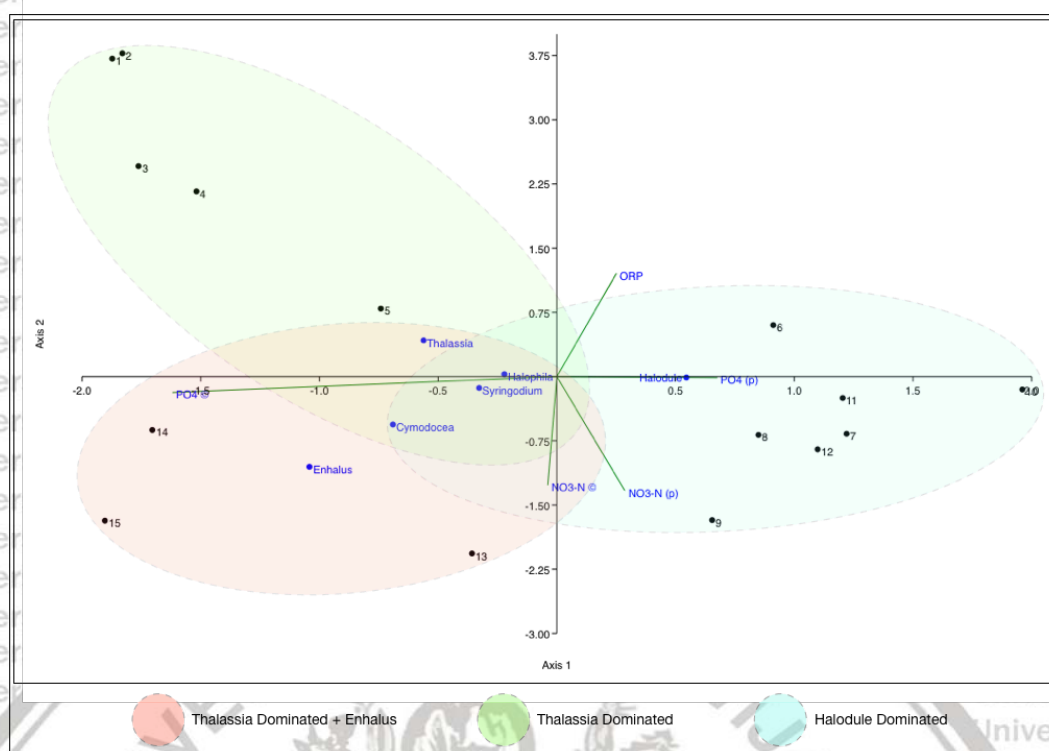


sebagai foraging habitat. Sementara itu Pulau Sangalaki dan Pulau Derawan merupakan nesting habitat populasi penyu yang tinggi.

*Halodule uninervis* merupakan jenis lamun yang menjadi preferensi utama makanan penyu hijau di Kepulauan Derawan (Christianen et al. 2014; Roem 2013b, 2013a). Hal ini disebabkan karena *Halodule highly digestible*/lebih mudah dicerna (de Longh et al. 2007) dibandingkan jenis lainnya (*Thalassia*, *Enhalus*) dan juga tersedia dengan melimpah. *H. uninervis* memiliki resistensi dan resiliensi tinggi terhadap tekanan grazing penyu, ditunjukkan oleh singkatnya *turnover time* yang berkisar antara 10 – 14 hari (Bjorndal 1980, 1985; Christianen 2013; Christianen et al. 2012; van der Heide et al. 2012; Moran and Bjorndal 2007; Rasheed et al. 2008; Roem 2013b). Roem (2013a) menyatakan bahwa *grazing rate* seekor penyu dengan bobot sekitar 100 Kg mencapai 374 gBK ind<sup>-1</sup> hari<sup>-1</sup>. Tekanan grazing secara kontinyu yang diiringi respon cepat pertumbuhan biomassa menyebabkan peningkatan nitrogen dan penurunan lignin pada daun, yang meningkatkan kualitas lamun sebagai makanan (Bjorndal 1980, 1985; López et al. 2019)

Dibandingkan periode Monsun Timur Laut, Transisi 1 dan Transisi 2, Komunitas lamun menunjukkan respon yang berbeda pada Monsun Barat Laut yang merupakan periode akhir migrasi reproduksi penyu. Periode ini sekaligus merupakan periode puncak tekanan *overgrazing* padang lamun oleh penyu hijau yang ditandai penurunan kerapatan dan tutupan lamun. Pada periode tersebut *H. uninervis* mengandalkan nutrisi dari pori sedimen untuk mempertahankan produksi dibawah tekanan grazing (gambar 65). Hal ini sebagai konsekuensi dari berkurang/hilangnya peranan daun lamun dalam menyerap nutrisi akibat grazing. Akar mengkompensasi kebutuhan nutrisi dalam bentuk partikel organik pada sedimen guna mempertahankan produktifitas (Evrard et al. 2005).





Gambar 65. Diagram CCA padang lamun periode Monsun Barat Laut (Juni-September) menunjukkan jenis lamun *H. uninervis* yang dominan pada stasiun 6-12 mengandalkan *uptake nutrient* dari air pori sedimen. Pergeseran budget *uptake nutrient* menjadi dominan oleh akar dikarenakan penurunan biomassa daun akibat grazing oleh penyu hijau.

Lebih lanjut Evrard et al., (2005) menyatakan *H. Uninervis* memiliki laju serapan nitrogen yang lebih tinggi dibandingkan *T. hemprichii*. Christiannen et al., (2011) membandingkan respon *H. uninervis* dan *T. hemprichii* terhadap nitrogen, pH dan cahaya dalam eksperimen selama 5 hari. Hasil penelitian menunjukkan *H. uninervis* lebih mampu mengatur kadar nitrogen melalui sintesa asam amino bebas glutamine dan asparagine dibanding *T. hemprichii*. Hal ini menjelaskan mengapa *H. uninervis* dapat pulih dan mampu merehabilitasi area yang mengalami tekanan dalam waktu relatif lebih singkat dibanding *T. hemprichii*. Menariknya Christianen et al., (2012) menyatakan grazing penyu menstimulus produktifitas *H. uninervis* sebesar 1.7 kali lipat sekaligus mengendalikan pengaruh peningkatan nutrisi. Stimulus aktifitas grazing penyu memacu penyerapan nutrisi dan meningkatkan produktifitas biomassa daun.



### 5.10.2 Biogeokimia Sedimen Padang Lamun

Parameter biogeokimia sedimen menyediakan petunjuk penting guna mengevaluasi stabilitas dan dinamika ekosistem padang lamun. Selain jenis dan tekstur sedimen, variabel lingkungan sedimen yang dapat menyediakan penjelasan proses biogeokimia sedimen antara lain DO, pH dan Potensial Reduksi Oksidasi. DO menunjukkan status atau tingkat kelarutan oksigen sementara pH menunjukkan tingkat keasaman dan kebasaan sedimen. Potensial Reduksi Oksidasi (ORP/*oxidation reduction Potential*) atau  $E_h$  merupakan ukuran tendensi dari unsur atau senyawa kimia untuk menerima elektron (reduksi) atau melepasnya (oksidasi).

Umumnya reaksi enzimatik merupakan reaksi reduksi oksidasi (redoks) dimana salah satu senyawa mengalami oksidasi sementara lainnya mengalami reduksi. Kemampuan organisme untuk melangsungkan reaksi redox bergantung pada kondisi potensial redox di lingkungannya. Mikroorganisme aerobik aktif pada kondisi redox positif (oksik) sementara golongan anaerob aktif pada kondisi sebaliknya sedangkan golongan anaerob fakultatif mampu bekerja pada kondisi redox positif maupun negatif (Musa et al. 2016). Potensial redox mempengaruhi solubilitas (daya larut) senyawa-senyawa nutrisi, termasuk ion logam (Werorilangi et al. 2016). Dalam bidang elektrokimia hubungan antara pH dan  $E_h$  atau potensial reduksi oksidasi yang dikenal dengan istilah Diagram Pourbaix digunakan untuk menilai stabilitas suatu unsur mineral dan spesi (materi) terlarut (Russel dan Hall 2009).



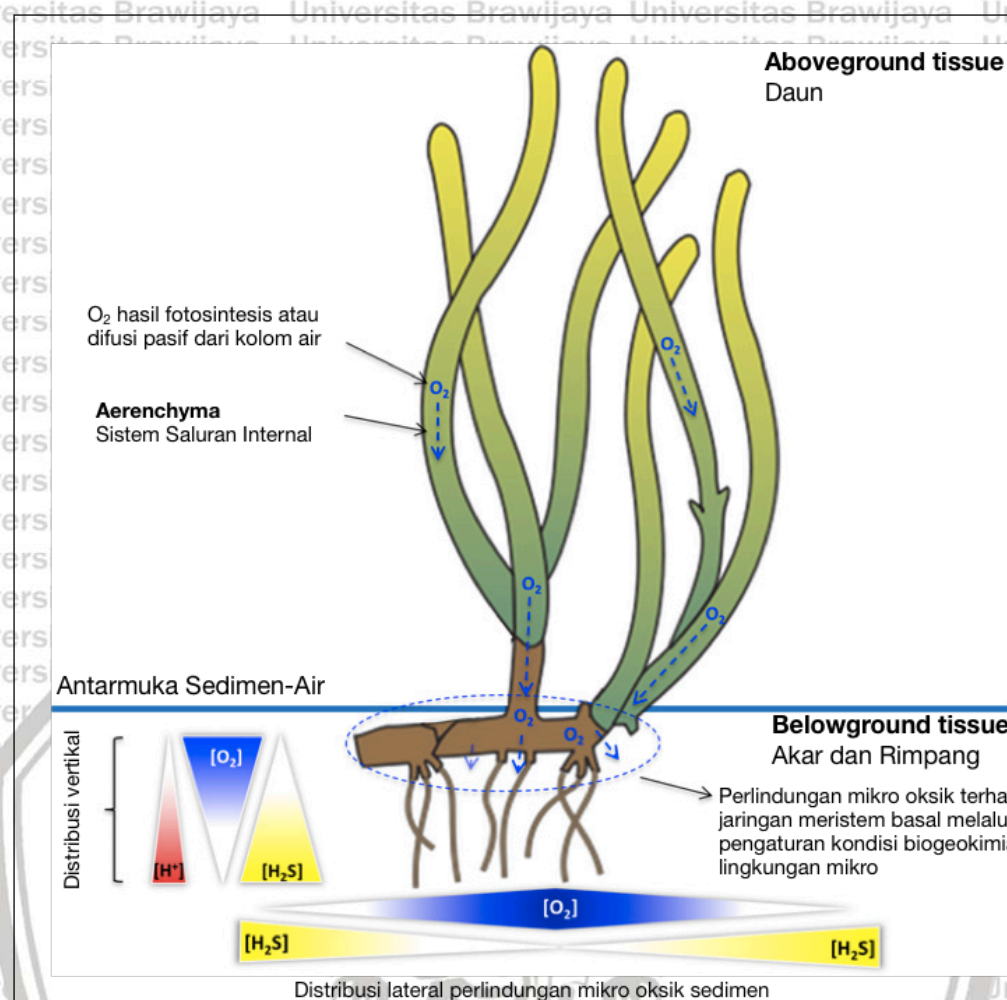
Tabel 20. Rerata potensial reduksi oksidasi dari penelitian terkait ekosistem padang lamun di beberapa negara Asia Tenggara.

Eh (mV) (Mean $\pm$ SE)	Lokasi	Jenis Lamun	Karakter Sedimen	Referensi
51.33 ( $\pm 19.29$ )	Bone Tambung, Kep. Spermonde, Indonesia	Ea	High CaCO <sub>3</sub> Sand	(Werorilangi et al. 2016)
91.9 ( $\pm 24.61$ )	Bone Tambung, Kep. Spermonde, Indonesia	Uv	High CaCO <sub>3</sub> Sand	
-115.33 ( $\pm 44.20$ )	Gusung Tallang, Kep. Spermonde, Indonesia	Ea	Low CaCO <sub>3</sub> Sand	
-52.37 ( $\pm 22.81$ )	Gusung Tallang, Kep. Spermonde, Indonesia	Uv	Low CaCO <sub>3</sub> Sand	
-74 ( $\pm 9.5$ )	Silaqui, Bolinao, NW Philippines	Ea, Cr, Cs, Th, Si, Hu	Coarse Carbonate	(Marbà et al. 2010)
-94.7 ( $\pm 10.9$ )	Pislatan, Bolinao, NW Philippines	Ea, Cr, Cs, Th, Si, Hu	Silt Carbonate	
-26 ( $\pm 20.3$ )	Lucera, Bolinao, NW Philippines	Ea, Cr, Cs, Th, Si, Hu	Carbonate	
92.7 ( $\pm 28.3$ )	Santa Barbara, Bolinao, NW Philippines	Ea	Silt Carbonate	
21.7 ( $\pm 21.3$ )	Buenavista, Palawan Island, Philippines	Ea, Cs, Hu	Carbonate	(van Katwijk, M. E.W. van der Welle, et al. 2011)
-95.4 ( $\pm 5.4$ )	Umalagan, Palawan Island, Philippines	Ea	Silt	
190.6 ( $\pm 44.4$ )	Bay Tien, Nha Trang, Vietnam	Th	Carbonate	
-9.1 ( $\pm 22.0$ )	My Gian 1, Nha Trang, Vietnam	Ea, Cr, Cs, Th, Hu	Carbonate	
87.9 ( $\pm 37.8$ )	My Gian 2, Nha Trang, Vietnam	Ea, Th, Cs	Carbonate	Penelitian ini
-99.1 ( $\pm 7.1$ )	Can Rhan, Nha Trang, Vietnam	Ea, Hu, Ho	Carbonate	
-19 ( $\pm 119$ )	Coastal Zone, Kep. Derawan, Indonesia	Hu, Th, Ho	Sand	
-26 ( $\pm 73$ )	Intermediate Zone, Kep. Derawan, Indonesia	Hu, Ho, Th, Sy, Cr	Carbonate	
26 ( $\pm 26$ )	Outer Zone, Kep. Derawan, Indonesia	Hu, Ho, Th, Sy, Cr, Ea	Carbonate	Penelitian ini
43 ( $\pm 4.56$ )	Panjang Reef Flat, Kep. Derawan, Indonesia	Hu, Ho, Th, Sy, Cr, Ea	Carbonate	

Uv : Unvegetated (pasir tidak bervegetasi di sekitar lamun)

Rerata potensial redoks padang lamun Pulau Panjang dari keempat periode sebesar  $43.48 \pm 4.56$  mV ( $n = 60$ ). Hal ini menunjukkan kondisi *transitory* antara *Hypoxic* dan *Oxic*, sementara kelarutan Oksigen pada air pori sedimen  $2.81 \pm 0.05$  mg l<sup>-1</sup> ( $n = 60$ ). Nilai ini hanya sepertiga kelarutan O<sub>2</sub> pada kolom air. Adapun nilai pH pada air pori sedimen  $7.72 \pm 0.02$  ( $n = 60$ ), sedikit lebih rendah dibandingkan pH pada kolom air. Konsentrasi O<sub>2</sub> dan pH air pori konsisten lebih rendah dibandingkan pada kolom air.





Gambar 66. Kondisi konseptual lingkungan mikro dan mekanisme perlindungan lamun. Gradien warna berkaitan dengan rhizosphere yang menggambarkan konsentrasi relatif dari unsur/senyawa kimia (biru, oksigen; kuning,  $H_2S$ ; merah, pH) (Brodersen et al. 2015).

Lamun tumbuh pada lingkungan sedimen yang memiliki kecenderungan bersifat reduksi dan anoksik. Oleh karenanya Lamun memiliki kemampuan untuk mempertahankan proses metabolisme aerobik pada akar dan rhizomanya dengan cara transport  $O_2$  dengan cepat melalui *aerenchyma* (Brodersen et al. 2015; Kasper Elgetti Brodersen et al. 2017). Aerasi terutama penting terutama dalam mencegah intrusi sulfida ke dalam akar dan rhizoma disaat kelarutan oksigen berkurang di waktu malam (Brodersen et al. 2015; Kasper Elgetti Brodersen et al. 2017; Kasper Elgetti. Brodersen, Hammer, et al. 2017).



Lamun secara aktif meningkatkan/memelihara kondisi lingkungan mikrorhizosfer (permukaan akar dan sekitarnya) melalui pelepasan  $O_2$  dan *allelochemicals* ke sedimen di sekitar jaringan akar dan rimpang (*belowground*) (Brodersen et al. 2015; Kasper Elgetti Brodersen et al. 2017; Kasper Elgetti.

Brodersen, Hammer, et al. 2017). Eksudasi ini menyediakan mekanisme pertahanan kimiawi dimana lamun mampu dengan secara instan mendetoksifikasi rhizosferenya (Kasper Elgetti, Brodersen, Koren, et al. 2017).

Sekresi senyawa organik berupa asam amino, gula, asam organik, dan vitamin oleh lamun menstimulus kolonisasi rizosfer oleh bakteri (Donnelly and Herbert 1999; Seymour et al. 2018). Transfer gas  $N$ ,  $O_2$  dan  $CO_2$  melalui *aerenchyma* (saluran kapiler internal) memfasilitasi proses metabolisme aerobik maupun anaerobik. Dengan demikian bakteri pada rizosfer mampu bekerja pada kondisi aerob dan anaerob untuk mengasimilasi atau melepas hasil mineralisasi.

Nitrogen terdapat di alam dengan berbagai bentuk (senyawa) dan berubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya melalui siklus nitrogen yang melibatkan mikroba. Bakteri yang bersimbiosis pada rizosfer lamun bekerja dalam kondisi aerobik maupun anaerobik untuk mengasimilasi dan atau melepaskan produk mineralisasi Nitrogen pada ekosistem lamun (Donnelly and Herbert 1999). Dalam konteks ekologi dan fisiologi lamun, tiga kelompok fungsional bakteri yang paling penting adalah heterotrof aerobik, bakteri pereduksi sulfat, dan bakteri diazotrofik/pengikat nitrogen (Seymour et al. 2018).

Sistem akar dan rimpang lamun dapat dianggap sebagai sumber nitrogen organik dan penyerap nitrogen anorganik (Donnelly and Herbert 1999). Vonk et al. (2008) membandingkan kemampuan *uptake*  $N$  dan asam amino menemukan bahwa akar lamun memiliki kemampuan tertinggi diikuti thalus makroalga, sedangkan daun lamun memiliki nilai terendah. Widén, (1996) menjelaskan bahwa faktor yang mempengaruhi laju nitrifikasi di padang lamun antara lain  $O_2$ ,



NH<sub>4</sub>, Cahaya, pH, dan Temperatur. Adapun Denitrifikasi, sebagaimana nitrifikasi diatur oleh ketersediaan O<sub>2</sub> dan temperatur. Kadar O<sub>2</sub> air pori sedimen (gambar 45) masih cukup memadai sehingga tidak menjadi faktor pembatas nitrifikasi.

Brodersen (2015) menjelaskan mekanisme biogeokimia dari kemampuan lamun tropis dalam memobilisasi besi dan fosfor pada rizosfer. Lamun memobilisasi fosfor dan besi dalam rimpang melalui asidifikasi (penurunan pH) lokal yang diinduksi tanaman. Penurunan pH menyebabkan pelarutan karbonat dan pelepasan fosfat (yang teradsorpsi pada permukaan sedimen karbonat).

Stimulasi mikroba sulfida pada rizosfer juga menyebabkan reduksi oksihidroksida Fe (III) yang tidak larut menjadi Fe (II) terlarut. Dengan demikian penurunan pH lokal menyebabkan pelepasan dan peningkatan bioavailabilitas fosfat dan Fe ke dalam air pori rhizosfer. Keberadaan mekanisme mobilisasi fosfor dan besi oleh rizosfer menjelaskan mengapa lamun tersebar luas di perairan tropis oligotrofik (Brodersen et al. 2015; Kasper Elgetti. Brodersen, Koren, et al. 2017).

Kemampuan lamun untuk mengoksidasi *rhizosphere* sangat bergantung pada cahaya (fotosintesis) dan ketersediaan oksigen. Dengan demikian pada malam hari lamun rentan terhadap intrusi sulfida dan fitotoksin akibat kecenderungan sedimen yang bergeser ke kondisi anoksik (Kasper Elgetti. Brodersen, Koren, et al. 2017). Pada situasi ini makroinvertebrata yang umumnya bersifat nocturnal memainkan peranan mempertahankan oksidasi pada sedimen. Makroinvertebrata dapat memelihara stabilitas biokimia substrat melalui proses bioturbasi (ekskavasi, *reworking*, dan bioirigasi). Bioturbasi oleh komunitas ini menyebabkan gangguan gradien tekanan dekat permukaan sedimen yang memicu difusi O<sub>2</sub> dari kolom air ke pori sedimen.



### 5.10.3 Implikasi Proses Fisik-kimia Sedimen dan Aktivitas

#### Makroinvertebrata Bentik Terhadap Padang Lamun

Tingginya kandungan nutrisi pada sedimen padang lamun tropis dibandingkan pada kolom air menunjukkan bahwa sedimen berperan sebagai reservoir nutrisi (Erftemeijer and Middelburg 1993; van Katwijk, M. E.W. van der Welle, et al. 2011; Meirinawati 2017; Purvaja et al. 2008, 2018; Vonk, Middelburg, et al. 2008). Lamun mengaktifkan nutrisi melalui regulasi internal dengan mengirimkan oksigen dan berbagai senyawa hasil fotosintesis ke lingkungan mikro rizosfernya. Mekanisme internal ini bersama proses bioturbasi oleh makroinvertebrata memelihara kondisi kesetimbangan reduksi oksidasi pada sedimen. Dengan demikian hal ini menjamin siklus nutrisi untuk mendukung pertumbuhan lamun.

Disisi lain aktivitas pemangsaan oleh invertebrata juga merupakan bentuk peningkatan siklus nutrisi melalui jalur detrital (Vonc, Christianen, et al. 2008). Resirkulasi P bergantung pada rezim redoks pada permukaan sedimen, sedangkan redoks bervariasi secara dinamis mengikuti bioturbasi, aktivitas akar, resuspensi sedimen dan ketersediaan  $O_2$  (Brodersen et al. 2015; Kasper Elgetti Brodersen et al. 2017; Parsons et al. 2017).

Terdapat hubungan kausal antara kondisi reduksi oksidasi sedimen terhadap keanekaragaman dan komposisi makroinvertebrata perairan (Holmer et al. 2005). Kondisi redoks di padang lamun Pulau Panjang sepanjang tahun berada dalam kisaran Oksik hingga Hypoxia, dengan keanekaragaman alfa sangat tinggi dan ketiadaan dominasi satu jenis/kelompok makroinvertebrata tertentu (Gambar 51). Hal ini menunjukkan kontinuitas suplai oksigen ke sedimen oleh lamun banyak digunakan untuk aktivitas metabolisme makroinvertebrata maupun mikroba. Kelimpahan polychaeta yang merupakan



indikator kondisi sedimen yang buruk (anoksik) dikendalikan oleh populasi gastropod predator cacing dari Family Mitridae, Terebridae, dan Turridae.

	Benthic Oxygen Zonation			
	Oxic A [III]	Oxic B [II]	Hypoxic [I]	Anoxic [0]
Eh (NHE mV)	>+100	+100 to 0	0 to -100	<-100
Total Sulfides (uM)	<300	300 to 1300	1300 to 6000	>6000
Dominant Metabolic Processes	Aerobic Metabolism $O_2$ and $CO_2$ Respiration Photosynthesis	Sulfate Reduction $SO_4^{=}$ reduced to $H_2S$ and $S^{=}$		Anaerobic Chemosynthesis $CO_2$ reduced to carbohydrates by oxidation of $H_2$ , $H_2S$ , $Fe^{++}$ , $NO_2^-$
Dominant Benthic Fauna/flora	Mega fauna (>5 cm) Macro fauna (>0.5 mm) Meio fauna (<0.5 mm) Aerobic algae/bacteria	Meio fauna Nematodes Facultative anaerobic bacteria	Protozoa Ciliates	Anaerobic bacteria

Gambar 67. Zonasi benthik berdasarkan gradien oksigen yang menggambarkan hubungan dan mekanisme biogeokimia antara Potensial Reduksi Oksidasi (mV), konsentrasi total sulfid ( $\mu M$ ), terhadap proses metabolik dominan komunitas benthik dan kelompok taksonomis tumbuhan dan hewan benthik (Holmer et al. 2005)

Rattanachot & Prathep (2016) melaporkan kelimpahan *Rugalucina vietnamica* (Bivalvia: Lucinidae) meningkat seiring peningkatan kompleksitas akar dan redox potential. Hal ini dikarenakan akar menyediakan habitat yang sesuai dan oksigen yang cukup (Rattanachot and Prathep 2016). Menariknya asosiasi antara *Rugalucina vietnamica* dengan *Thalassia hemprichii* di Thailand memiliki pola yang serupa dengan Padang Lamun Pulau Panjang.

Kelimpahan dan keanekaragaman makroinvertebrata di padang lamun merupakan indikasi stabilitas ekosistem. Kondisi reduksi oksidasi mempengaruhi keanekaragaman, kelimpahan dan distribusi spasial organisme benthik (Harguinteguy, Noelia Cofré, and Pastor De Ward 2012). Sementara banyaknya makroinvertebrata memicu tingginya tingkat bioturbasi (Thibault de Chanvalon et al. 2016) yang membantu regenerasi dan resirkulasi nutrisi untuk digunakan padang lamun. Kecenderungan dinitrifikasi dan oksidasi anaerob ammonium

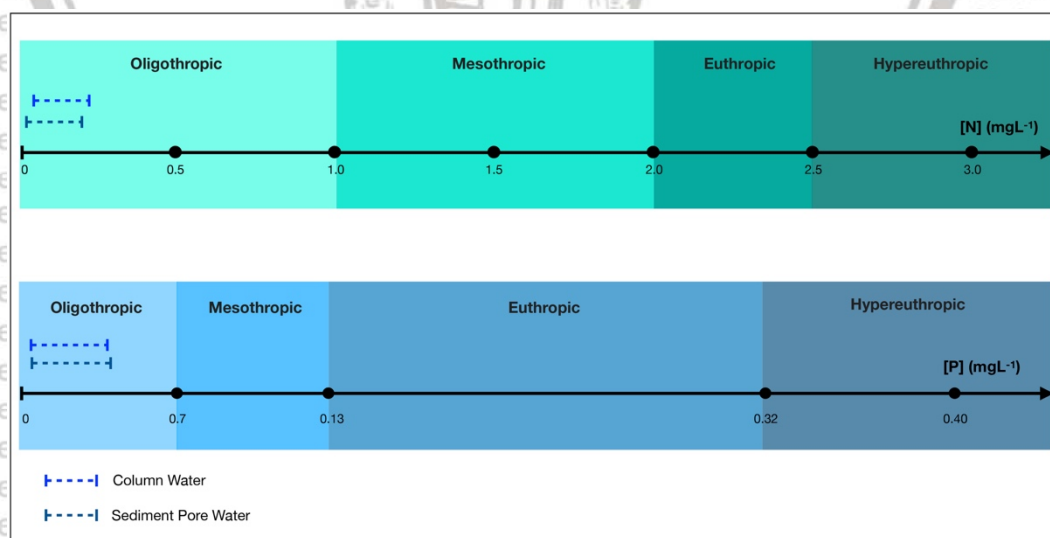


menyebabkan penurunan kondisi padang lamun (Garcias-Bonet et al. 2018).

Sebaliknya keberadaan padang lamun menstabilisasi sedimen dari efek negatif hidrodinamika perairan secara fisik, secara kimia lamun mengoksidasi sedimen dan memperkaya sedimen dan lingkungan dengan senyawa organik yang diperlukan makroinvertebrata dan organisme lain seperti ikan. Interaksi saling memberi dan menerima manfaat diantara komponen ekosistem ini merupakan petunjuk mengenai adanya mekanisme ekologi yang menjaga stabilitas dinamis padang lamun Pulau Panjang.

#### 5.10.4 Riverine Input dan Potensi Eutrofikasi Padang Lamun Pulau Panjang

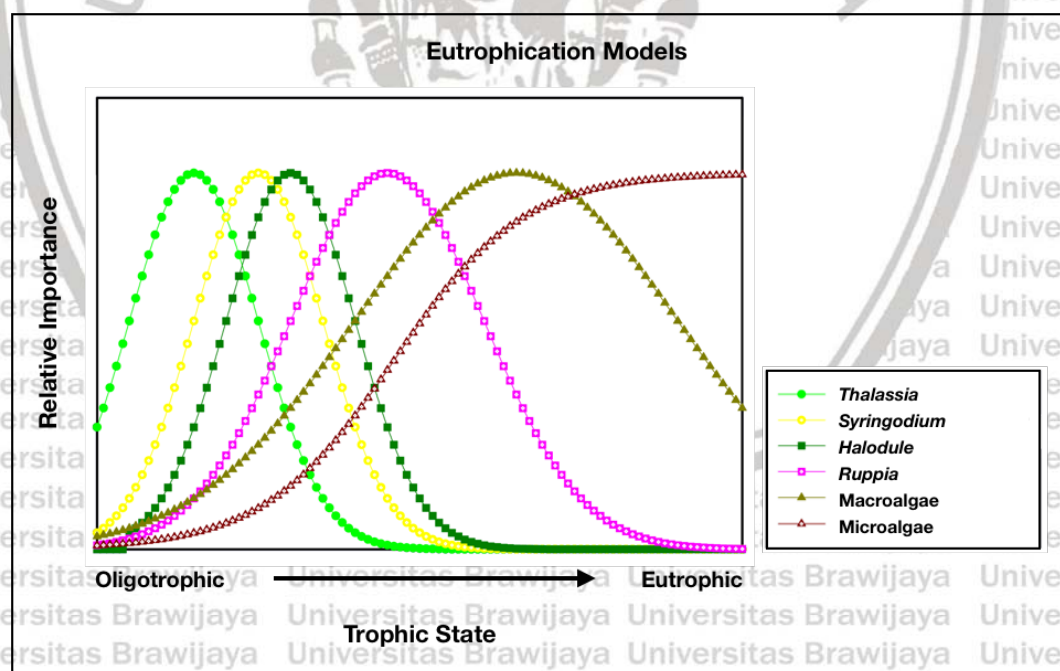
Pada bagian sebelumnya telah terdeteksi adanya sinyal pengaruh Sungai Berau terhadap ekosistem di Pulau Panjang. Beberapa penelitian melaporkan angkutan nutrien Sungai Berau terhadap perairan Kepulauan Derawan berkaitan dengan dinamika pasang surut (Buschman et al. 2010, 2012), sebaran plume sungai oleh angin monsun (Tarya et al. 2018, 2015) (Tarya et al. 2010, 12). Hal ini tercermin pada kondisi kualitas air dan sedimen (Buschman et al. 2010, 2012; van Katwijk, M. E.W. van der Welle, et al. 2011).



Gambar 68. Kisaran nilai variabel nutrien (N dan P) dari air Kolom dan air pori sedimen di padang lamun Pulau Panjang pada skala tingkat trofik perairan padang lamun (Lapointe, Tomasko, and Matzie 1994).



Status trofik perairan pulau panjang selama 4 periode pengamatan sepanjang tahun (Monsun Timur Laut, Transisi 1, Monsun Barat Daya dan Transisi 2) menunjukkan kondisi Oligotrofik. Situasi tersebut kondusif bagi pertumbuhan ekosistem padang lamun secara optimal. Meskipun terdapat variasi spasial dimana nutrisi porewater pada stasiun 13, 14, 15 sedikit lebih tinggi dibanding stasiun lainnya, kandungan nutrisi masih berada dalam batasan oligotrofik. Secara temporal, terdapat kemungkinan penambahan nutrisi (N) pada kolom air saat Monsun Barat Daya (JJA) dimana hembusan angin selatan mendorong distribusi Plume Sungai Berau menuju reef flat pulau panjang (Tarya et al. 2018, 2015) khususnya pada stasiun 9, 10, 11, 12, 13, 14 dan 15. Penguatan pengaruh sungai terhadap padang lamun (angkutan nutrisi dan sedimen) dalam jangka panjang berpotensi memicu eutrofikasi di Pulau Panjang (van Katwijk, M. E W van der Welle, et al. 2011).



Gambar 69. Skenario pergeseran spesies antara dominasi/kelimpahan jenis/kelompok produsen primer terhadap pergeseran status trofik perairan akibat peningkatan nutrisi (Fourqurean 2014; Fourqurean and Rutten 2003).



Eutrofikasi dapat menggeser kesetimbangan ekosistem melalui perubahan komposisi dan dominasi jenis organisme akibat perbedaan kemampuan kompetitif sekaligus tingkat toleransi terhadap peningkatan availabilitas nutrisi. Eutrofikasi menstimulus pertumbuhan produser yang memiliki tingkat pertumbuhan cepat (*fast growing species*). Seiring peningkatan ketersediaan nutrisi, terjadi peningkatan makro alga (baik epifit, epiphytic dan rhizopytic) yang diiringi dengan penurunan lamun akibat persaingan kebutuhan cahaya. Pada tahap selanjutnya micro algae akan mulai dominan sebagai respon peningkatan nutrient secara linier. Pada akhirnya ledakan populasi mikroalga (*blooming*) menurunkan populasi lamun yang tidak dapat bertahan pada kondisi cahaya minimum akibat peningkatan kekeruhan oleh kelimpahan mikroalga.

Terkait dengan kompetisi akan kebutuhan Nutrien, Risjani (1999b) menunjukkan bahwa pada lingkungan budidaya, tingkat pertumbuhan makro alga *Kappaphycus alvarezii* berhubungan positif terhadap peningkatan kandungan nitrogen pada biomassa thallusnya dan di lingkungan. Lebih lanjut Risjani et al. (1995) menjelaskan respon *uptake rate* makroalga terhadap pemberian N lebih ditentukan oleh durasi dibandingkan konsentrasi. Pada saat puncak penyerapan, kadar N pada jaringan thallus makro alga tinggi dan stabil. Laju pertumbuhan makro alga umumnya mengalami peningkatan pesat pada periode tertentu, bergantung pada umur tanaman tersebut dan setelah mencapai puncak laju pertumbuhan akan menurun (Risjani 1999a). Lebih lanjut Risjani (1999a) menjelaskan bahwa laju akuisisi N oleh makroalga terhadap penambahan konsentrasi N mengikuti kurva sigmoid dimana ketika kondisi internal N di thallus telah jenuh, maka dengan sendirinya *uptake rate* menurun meskipun konsentrasi ditambah dan durasi *exposure* diperpanjang. Dengan demikian *incidental nutrient load* yang tinggi tidak akan berpengaruh signifikan sepanjang tidak terjadi dalam rentang waktu (durasi) yang panjang dan konsisten.



Ekosistem padang lamun memiliki kemampuan mengatur availabilitas nutrisi terutama N dan P disekitarnya (Erftemeijer and Middelburg 1993; Evrard et al. 2005; Vonk, Middelburg, et al. 2008). Retensi nutrisi oleh lamun dilakukan pada daun, sementara itu keberadaan makroinvertebrata dan herbivor lainnya mempersingkat siklus N melalui jalur detrital. Pola ini membatasi jumlah N yang dilepas ke kolom air sehingga membatasi pertumbuhan makro alga (mencegah alga *overgrowth*) dan mikro alga/fitoplankton (mencegah blooming). Disisi lain pelarutan P dari sedimen (karbonat) juga hanya untuk pemenuhan keperluan internal lamun. Dengan demikian ekosistem padang lamun memelihara ketersediaan nutrisi dan menjaganya tetap pada kondisi oligotrofik meskipun banyak tersedia di sedimen karbonat (Brodersen et al. 2015; Kasper Elgetti. Brodersen, Hammer, et al. 2017; Kasper Elgetti. Brodersen, Koren, et al. 2017; López et al. 2019; van Tussenbroek et al. 2006). Mekanisme ini secara internal memelihara fungsi fisiologi dan pertumbuhan, sekaligus secara eksternal menghambat pertumbuhan produsen primer lain yang dalam hal ini dapat dianggap sebagai kompetitor.

## **5.11 Sintesis**

### **5.11.1 Ekosistem Padang Lamun Pulau Panjang Dalam Konstelasi**

#### ***Monsoonal Wave Climate***

Bumi memiliki sistem yang dinamis dalam berbagai aspek. Proses geologis (endogen) membentuk daratan laut, bersamaan dengan itu dinamika dan interaksi antara komponen hidro-oseanografi dan klimatologi atmosfer membentuk permukaan dasar laut dangkal beserta ekosistem diatasnya.

Dinamika dan interaksi yang dibentuk oleh atmosfer dan laut bervariasi dalam skala ruang dan waktu. Pulau Panjang sebagai salah satu pulau yang berdekatan dengan garis khatulistiwa (2°) menjadi objek kajian dinamika ekosistem padang lamun tropis beserta komunitas makroinvertebrata



asosiatifnya dalam konstelasi sirkulasi klimatologi antar benua yang berkelindan dengan proses hidro-oseanografi.

Angin monsun bertemu dengan pola dasar angin dan di pesisir Timur Laut Kalimantan yang berbatasan dengan sisi barat dari Laut Sulawesi membentuk *monsoonal wave climate regime* di perairan Pulau Panjang.

Pergiliran monsun pada lapisan atmosfer memantik variabilitas sebagian variabel lingkungan dan ekosistem padang lamun Pulau Panjang. Sebagian lainnya menunjukkan fluktuasi yang tidak berbeda nyata dikarenakan lebih dikontrol kondisi tunak (*steady state*) yang dipengaruhi oleh massa air Laut Sulawesi pada skala harian (diurnal), dalam hal ini dimediasi oleh pasang surut (termasuk *tidal wave*) dan arus pasang surut. Proses jangka panjang dan kontinyu ini membentuk sebuah bentang ekosistem padang lamun Pulau Panjang dengan kesetimbangan dinamis secara fisik, kimia, dan biologis.

#### 5.11.2 Zonasi Padang Lamun Pulau Panjang

Komposisi jenis padang lamun di pulau panjang menunjukkan *self spatial arrangement* sebagai mekanisme respon terhadap gradien pengaruh variabel fisik dan kimia perairan. Faktor-faktor yang membentuk zonasi tersebut antara lain; (1) morfodinamika reef flat Pulau Panjang yang dibentuk oleh rezim hidro-oseanografi fisis perairan (*monsoonal wave climate* dan sirkulasi diurnal), (2) distribusi jenis dan tekstur sedimen yang menjadi substrat tumbuh lamun (secara fisik; kesesuaian ukuran dan sistem perakaran, secara kimiawi; ketersediaan/bioavalabilitas senyawa nutrien) yang diperlukan lamun, (3) karakteristik fisik-kimia pada kolom air dan air pori sedimen.

Hasil penelitian mengindikasikan adanya pengaruh sungai/*riverine input* (*nutrient* dan *sediment load*) oleh Sungai Berau terhadap sebagian wilayah ekosistem padang lamun di Pulau Panjang. Angkutan nutrien dan sedimen merefleksikan akumulasi dampak negatif jangka panjang aktifitas pembangunan



pada sisi daratan (pembukaan hutan untuk industri kayu, perkebunan kelapa sawit dan ekstraksi batubara) secara ekstensif yang terjadi selama beberapa dekade terakhir (1970 – 2020).

Dominasi jenis *Halodule uninervis* merupakan penciri zona ekosistem padang lamun yang merespon pengaruh sungai. Sementara zona dominan *Thalassia hemprichii* merepresentasi ekosistem dengan pengaruh laut lepas. Distribusi *Enhalus acoroides* yang terbatas di sisi barat pulau Panjang mencirikan kondisi hidrodinamika perairan yang tenang. Terdapat interpenetrasi pada bagian tepi zona yang merupakan edge effect dari dua jenis yang dominan yang berbeda. Pada zona transisi (*ecotone*) tingkat keanekaragaman lebih tinggi dikarenakan *species overlapping* dari dua jenis lamun dominan beserta makroinvertebrata asosiatifnya yang saling berupaya memperluas koloni.

#### 5.11.3 Mutualisme Lamun dan Makroinvertebrata

Kompleksitas struktur dan fungsi ekologis padang lamun menopang kehidupan berbagai jenis biota melalui *trophic facilitation* dan *non-trophic facilitation*. Tingkat keanekaragaman dan kelimpahan Makroinvertebrata merupakan salah satu indikator tingginya tingkat kesehatan dan tingkat layanan ekologis padang lamun Pulau Panjang. Distribusi dan asosiasi antar jenis dibentuk oleh preferensi kebutuhan minimum untuk kelangsungan hidup dan tingkat toleransi yang bersifat spesies spesifik dari makroinvertebrata. Afinitas dan interaksi baik antara lamun dengan makroinvertebrata maupun diantara sesama makroinvertebrata mengkonstruksi niche atau relung ekologi yang kompleks. Dengan demikian gangguan yang diterima oleh ekosistem padang lamun secara fisik, kimia, maupun biologis direspon secara bersama sebagai konsekuensi dari interaksi dan interdependensi antara komponen lamun dan makroinvertebrata.



Respon yang diberikan dapat berlangsung pada tingkat individu atau jenis tertentu, pada tingkat komunitas, pada tingkat ekosistem hingga pada tingkat lansekap. Berbeda dengan lamun yang merupakan produser primer, makroinvertebrata terbagi atas berbagai kelompok fungsional yang beragam. Sehingga terbentuk distribusi asosiasi dan pola penggunaan habitat di ekosistem padang lamun. Setiap jenis makroinvertebrata berkontribusi secara spesifik pada mikrohabitat preferensinya di padang lamun. Secara umum makroinvertebrata berperan dalam memelihara kesehatan padang lamun melalui aktifitas grazing terhadap alga epifit, penyingkatan siklus materi melalui jalur detrital, aktifitas bioturbasi dan berperan sebagai polinator. Kompleksitas interaksi dan niche yang terbentuk merupakan elemen yang bersinergi dalam konteks penguatan stabilitas, resistensi, maupun resiliensi ekosistem padang lamun terhadap gradient dan fluktuasi variabel lingkungan maupun predasi dan kompetisi.

#### 5.11.4 Dinamika dan Stabilitas Ekosistem Antar Monsun

Dinamika muson di lokasi kajian dicirikan oleh pembalikan arah angin dominan antara Monsun Timur Laut (Desember hingga Maret dan Monsun Barat Daya (Juni hingga September). Angin muson mempengaruhi hidrodinamika perairan yang membentuk *monsoonal wave climate* di perairan Pulau Panjang.

Dinamika fisik ini selanjutnya memicu fluktuasi sebagian parameter fisik dan kimia pada kolom perairan yakni temperatur, DO, pH, dan TSS. Sementara itu parameter nutrisi (Nitrat dan Fosfat) tidak memperlihatkan variabilitas muson yang berarti. Salinitas berada pada kondisi stabil di setiap muson dan transisi yang mengindikasikan pengaruh input massa air *Indonesian Throughflow* (ITF) di Laut Sulawesi. Sampel air pori sedimen (*sediment porewater*) tidak menunjukkan variabilitas muson yang signifikan. Hal ini menunjukkan kemampuan padang lamun memelihara kondisi fisik kimia perairan habitatnya melalui pengaturan potensial reduksi oksidasi guna mempertahankan bioavailabilitas nutrisi.



Padang lamun Pulau Panjang menunjukkan respon dinamis dalam upaya mempertahankan kestabilan sistem. Analisis menunjukkan tidak ada perbedaan centroids  $\beta$ -diversity Padang Lamun antar musim. Bagaimanapun, terdapat pergeseran dispersi  $\beta$ -diversity yang menunjukkan respon dan fluktuasi parsial pada hamparan padang lamun yang didominasi oleh jenis *Halodule uninervis*. Hal ini ditengarai akibat tekanan grazing Penyu Hijau pada musim reproduksi yang berlangsung antara Februari (Monsun Timur Laut) hingga Agustus (Monsun Barat Daya). Rentang waktu selanjutnya (September-Januari) nampaknya merupakan jeda waktu dimana padang lamun memulihkan kondisi tegakan dan kepadatan menuju periode tekanan grazing pada tahun berikutnya.

Sementara itu komunitas makroinvertebrata asosiatif padang lamun Pulau Panjang menunjukkan dinamika yang lebih variatif. Centroids dan dispersi  $\beta$ -diversity makroinvertebrata pada Monsun Timur laut berbeda terhadap semua periode pengamatan lainnya (Monsun Barat Daya, Transisi 1 dan Transisi 2), dan tidak ditemukan perbedaan yang signifikan diantara ketiganya. Hal ini menunjukkan bahwa respon komunitas Makroinvertebrata tidak mengikuti respon musiman padang lamun dikarenakan gangguan yang dialami komunitas lamun tidak serta merta menyebabkan gangguan terhadap makroinvertebrata yang sebagian besar bersifat epifauna dan infauna. Menariknya keberadaan makroinvertebrata menunjang resistensi dan resiliensi lamun melalui proses bioturbasi yang memfasilitasi ketersediaan nutrisi dan oksigen terlarut pada air pori sedimen.

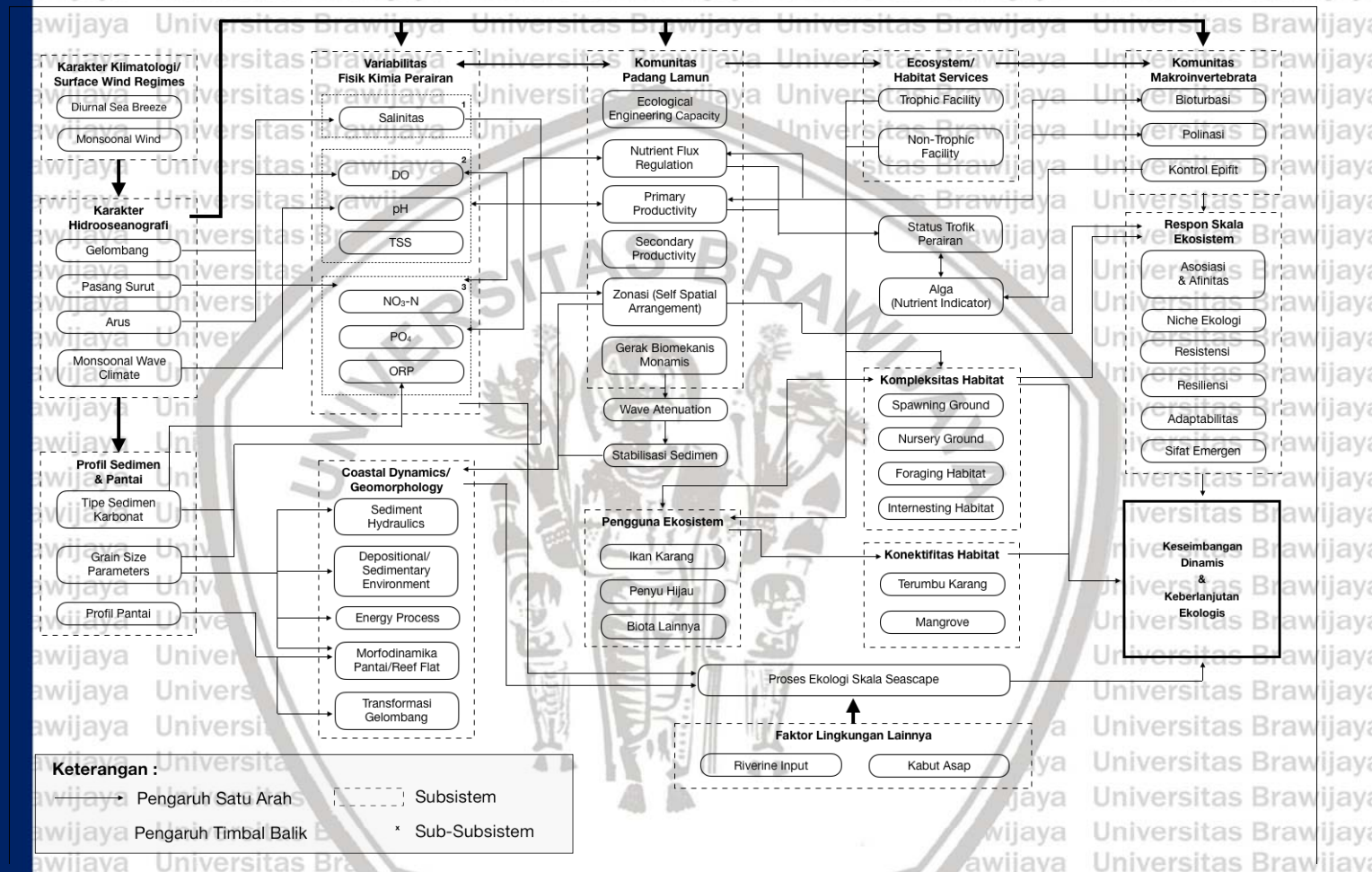
Secara akumulatif padang lamun dan makroinvertebrata di Pulau Panjang menunjukkan tingkat adaptabilitas yang mampu mengatasi pengaruh dan tekanan dinamika lingkungan. Dengan demikian siklus monsun tidak memberikan pengaruh antar musim yang signifikan terhadap keseimbangan dinamis dari ekosistem padang lamun di Pulau Panjang Kepulauan Derawan. Di Benua



Maritim Indonesia, dinamika monsunal padang lamun tidak menunjukkan pola seragam. Hal ini dikarenakan variabilitas klimatologi regional yang dibentuk oleh kompleksitas distribusi daratan dan perairan di sepanjang Kepulauan Indonesia. Selanjutnya interaksi klimatologi dan oseanografi lokal membentuk karakteristik fisik kimia oseanografi habitat padang lamun. Respon dan dinamika padang lamun pada level ekosistem ditentukan oleh tingkat keanekaragaman, kelimpahan dan variabilitas organisme yang menyusun niche ekologi. Hal lain yang perlu dipertimbangkan adalah interkoneksi antar ekosistem laut dangkal yang memfasilitasi proses ekosistem skala bentang laut (seascape).

Keseimbangan dinamis padang lamun di Pulau Panjang Kepulauan Derawan menunjukkan kapasitas resiliensi dan adaptabilitas yang baik terhadap variabilitas monsunal. Hal ini dapat diasumsikan berlaku secara general terhadap dinamika monsunal ekosistem padang lamun di Indonesia. Hasil penelitian ini bersama dengan penelitian dari Kepulauan Spermonde (Arifin and Jompa 2005; Erftemeijer and Herman 1994; Stapel, Manuntun, and Hemminga 1997; Supriadi 2012; Vonk et al. 2010) Kepulauan Wakatobi (Unsworth et al. 2010), Kepulauan Seribu (Rustam et al. 2014), Kepulauan Karimunjawa (Rustam et al. 2019) dan Singapura (Mckenzie et al. 2016) menunjukkan adaptabilitas ekosistem padang lamun terhadap dinamika yang dipicu oleh siklus monsun secara langsung maupun tidak langsung meskipun ada ketidakseragaman dan kompleksitas pada bentuk respon dan dinamika ekosistem yang berlangsung. Olehnya itu diperlukan penelitian lebih detail mengenai bentuk respon dan dinamika monsunal dari padang lamun dari daerah-daerah lain sebagai konsekuensi dari adanya variabilitas klimatologi lokal, karakteristik hidrooseanografi, perbedaan komponen biota penyusun ekosistem dan interkoneksi antar ekosistem laut dangkal.





Gambar 70. Model konseptual sinekologi padang lamun beserta makroinvertebrata asosiatifnya kaitannya dengan siklus monsun di Pulau panjang Kepulauan Derawan.



Model konseptual sinekologi merupakan kesimpulan umum penelitian yang menunjukkan variabel dan elemen pembentuk dinamika padang lamun beserta komunitas makroinvertebrata asosiatif sebagai respon terhadap siklus klimatologis berupa *monsoonal wave climate* di Pulau Panjang.

#### 5.11.5 Sifat Sibernetik Ekosistem Padang Lamun

Sinekologi atau dinamika ekosistem padang lamun Pulau Panjang menunjukkan stabilitas terhadap perubahan lingkungan yang berasosiasi dengan siklus monsun. Fluktuasi berbagai variabel lingkungan dan gangguan eksternal direpson dengan berbagai adaptabilitas baik oleh lamun maupun makroinvertebrata. Pendekatan model-model ekologi dalam penelitian ini mengarah pada satu petunjuk akan keberadaan struktur kognitif kompleks yang dimiliki oleh ekosistem padang lamun Pulau Panjang. Hal tersebut dinamakan sifat dan atau mekanisme sibernetik ekosistem.

Sifat sibernetik merupakan karakter ekosistem yang menunjukkan kapasitas kontrol dan regulasi komponen sistem sebagai satu tatanan terintegrasi (McNaughton and Coughenour 1981). Mekanisme pengendalian ekosistem ini bersifat internal dan difusif. Sifat sibernetik dapat berupa interaksi antara komponen ekosistem (trofik), respon sub-sistem (komponen tertentu secara parsial) yang bekerja secara spesifik terhadap stimulus eksternal, respon pada tingkat komunitas (asosiasi dan afinitas) dan kemampuan rekayasa ekologi (*engineering ecology*) pada tingkat lansekap.

Sifat emergen dan sifat kolektif dari komponen penyusun ekosistem berkontribusi dalam meningkatkan resistensi dan resiliensi dari ekosistem. Dalam hal ini heterogenitas dan variabilitas yang terjadi pada lingkungan akan memunculkan sifat-sifat baru (emergen) dari ekosistem yang tidak dapat direduksi dan berbeda dengan sifat-sifat bagian dari komponen yang menyusunnya. Dengan demikian kesetimbangan dinamis lansekap ekosistem



padang lamun Pulau Panjang memiliki karakteristik dan dinamika yang terbentuk oleh heterogenitas dan variasi klimatologi, hidro-oseanografi, dan geomorfologi lokal.

Meskipun memiliki batasan fisik yang jelas, ekosistem padang lamun Pulau Panjang pada hakikatnya merupakan entitas termodinamika terbuka.

Dengan demikian sedikit banyak kesetimbangannya bersifat dinamis, dipengaruhi oleh energi dan materi yang masuk dan keluar dari sistem.

Penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi ekosistem tidak hanya ditentukan oleh proses yang terjadi di reef flat Pulau Panjang. Tetapi juga menunjukkan adanya pengaruh antar sistem yang dekat dalam hal ini mangrove dan terumbu karang di Pulau Panjang, maupun sistem sungai dan estuari di Muara Sungai Berau. Interaksi antar sistem meskipun jarak jauh, dapat menentukan stabilitas struktur dan resiliensi sebuah ekosistem pesisir (Van De Koppel et al. 2015).

#### **5.11.6 Implikasi Bagi Pengelolaan Ekosistem dan Pertanyaan Penelitian**

##### **Selanjutnya**

Secara alamiah ekosistem dapat memperbaiki dan mempertahankan keberlanjutannya (Rudianto and Isdianto 2020). Akan tetapi perubahan iklim dan akumulasi dampak antropogenik dalam mendegradasi ekosistem pesisir lebih kuat dibanding kemampuan pulih alamiah ekosistem. Oleh karenanya dibutuhkan pendekatan pengelolaan dalam upaya restorasi ekosistem (Rudianto 2017).

Strategi dapat bersifat mitigasi dalam bentuk regulasi fungsi ekologis habitat-habitat penting serta bersifat adaptasi melalui pemetaan dan evaluasi produktifitas (tingkat layanan) ekosistem pesisir yang rentan (Budimawan 2014).

Tingkat layanan ekosistem padang lamun dapat dievaluasi dengan pendekatan *Carrying Capacity* (Daya Dukung Keberlanjutan Ekosistem).

Pendekatan berbasis daya dukung telah lama diaplikasikan sebagai tools dalam pengelolaan kawasan konservasi ekosistem teresterial. Sebagai kawasan



konservasi, tingkat layanan ekosistem padang lamun Pulau Panjang dapat ditentukan berdasarkan komponen *Supportive* dan *Assimilative Capacity*.

*Assimilative capacity* menggambarkan ukuran kemampuan padang lamun dalam menetralkan dan mengasimilasi gangguan yang bersifat kimiawi pada perairan atau kolom udara di atasnya. Sementara itu *supportive capacity* menggambarkan daya tampung suatu unit luasan padang lamun dalam mampu mendukung keberlanjutan keanekaragaman hayati secara biologis (makanan dan habitat), dan secara fisik kemampuan menstabilkan sedimen terhadap hidrodinamika perairan yang destruktif.

*Carrying capacity* ditentukan secara multi temporal baik bulanan atau pada setiap musim dimana berdasarkan fluktuasi kondisi ekosistem dipilih suatu parameter atau variabel *benchmarking* bagi evaluasi kondisi padang lamun dimusim yang sama pada suatu rentang waktu pengelolaan. Berbarengan dengan itu perlu rekonstruksi pemahaman proses dan dinamika ekosistem secara komprehensif dan integratif sebagai implikasi dari proses diluar ekosistem padang lamun (*monsoonal wave climate* dan *riverine input* sebagai proksi antropogenik).

Kebutuhan akan sebuah model konservasi ekosistem padang lamun yang menempatkan pengembalian fungsi ekologis sebagai indikator utama keberhasilannya merupakan kebutuhan urgen (Rani et al. 2009) sementara keterpaduan model pengelolaan terhadap entitas maupun sistem sosial mutlak diperlukan (Rudianto 2014; Tuwo 2011). Hal ini bukanlah perkara yang mudah namun diperlukan dalam rangka mempertahankan keberlanjutan layanan ekosistem dan biodiversitas bagi perikehidupan manusia. Karenanya pencarian inovasi kearah kesetimbangan dan keberlanjutan ekologi tersebut hendaknya dijadikan sebagai persoalan prioritas dalam penelitian (Leung et al. 2020).



## BAB VI

## KESIMPULAN DAN SARAN

## 6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan dan uraian analisis maka dapat ditarik kesimpulan antara lain :

1. Siklus *Asian Winter Monsoon* dan *Australian Summer Monsoon* mempengaruhi kondisi hidrodinamika perairan Pulau Panjang yang membentuk pola *monsoonal wave climate*.
2. Siklus Monsun memantik fluktuasi musiman sebagian variabel fisik kimia perairan ekosistem padang lamun Pulau Panjang yang mana dinamika tersebut berkaitan dengan faktor intrinsik dan ekstrinsik masing-masing variabel.
3. Dinamika Monsun padang lamun pada level lansekap menunjukkan kondisi kesetimbangan dinamis. Meski demikian terdapat respon parsial pada zona dominan *Halodule uninervis*. Fluktuasi tegakan dan kerapatan pada zona tersebut berkaitan dengan peningkatan tekanan yang diterima padang lamun sebagai *foraging habitat* pada periode *internesting* penyu hijau yang berlangsung antara akhir Monsun Timur Laut hingga Monsun Barat Daya.
4. Dinamika Monsun makroinvertebrata asosiatif padang lamun berada pada kondisi lebih variatif dimana keanekaragaman beta pada Monsun Timur Laut berbeda terhadap Monsun Barat Daya dan kedua periode Transisi. Bagaimanapun kelimpahan dan keanekaragaman makroinvertebrata berada pada kondisi yang relatif baik, menunjukkan tingkat stabilitas dinamis yang tinggi sebagai respon adaptif terhadap perubahan lingkungan pada habitatnya.



5. Interaksi mutualisme antara komunitas lamun dan makroinvertebrata memfasilitasi kemunculan sifat kolektif dan sifat emergen yang meningkatkan resistensi, resiliensi dan adaptabilitas ekosistem terhadap fluktuasi kondisi lingkungan baik yang dipicu siklus muson secara langsung maupun tidak langsung.

## 6.2. Saran

Adapun saran yang diajukan antara lain :

1. Penelitian ini belum secara khusus mempertimbangkan keberadaan terumbu karang pada tepi reef flat maupun mangrove di sekeliling Pulau. Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut untuk melihat interkoneksi antara ekosistem terumbu karang, padang lamun dan mangrove Pulau Panjang dalam konteks daya dukung keberlanjutan dan valuasi nilai layanan ekologi sebagai *benchmarking* perencanaan dan evaluasi pengelolaan.
2. Salah satu komponen ekosistem padang lamun Pulau Panjang yang tidak dikaji dalam penelitian ini adalah komunitas ikan. Diperlukan penelitian untuk mengidentifikasi peran dan signifikansi kehadiran ikan terhadap dinamika ekosistem.
3. Merujuk pada tingginya tingkat keanekaragaman dan kelimpahan makroinvertebrata khususnya yang bernilai ekonomis penting, maka direkomendasikan kajian lebih lanjut untuk mengintegrasikan hasil penelitian ini terhadap kebijakan pengelolaan dan pemanfaatan Padang Lamun Pulau Panjang sebagai bentuk optimalisasi manfaat sosial, ekonomi dari sumberdaya tersebut bagi masyarakat setempat.



## DAFTAR PUSTAKA

- Aji, Ludi Parwadani, and Andriani Widyastuti. 2015. *Katalog Moluska Unit Pelaksana Teknis Loka Konservasi Biota Laut Biak Seri 1 GASTROPODA: STROMBIDAE*.
- Aji, Ludi Parwadani, and Andriani Widyastuti. 2016. *Mollusca Gastropoda Conidae Papua*.
- Aldrian, E., L. Dümenil Gates, and F. H. Widodo. 2007. "Seasonal Variability of Indonesian Rainfall in ECHAM4 Simulations and in the Reanalyses: The Role of ENSO." *Theoretical and Applied Climatology* 87(1-4):41-59. doi: 10.1007/s00704-006-0218-8.
- Aldrian, Edwin. 2001. "Pembagian Iklim Indonesia Berdasarkan Pola Curah Hujan Dengan Metoda 'Double Correlation' (Climate Categories in Indonesia Based on Rain Pattern Using 'Double Correlation' Method)." *Jurnal Sains Dan Teknologi Modifikasi Cuaca (Journal of Sciences and Technology of Weather Modification* 2(1):11-18.
- Aldrian, Edwin. 2008. *Meteorologi Laut Indonesia*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Aldrian, Edwin, and R. Dwi Susanto. 2003. "Identification of Three Dominant Rainfall Regions within Indonesia and Their Relationship to Sea Surface Temperature." *International Journal of Climatology* 23(12):1435-52. doi: 10.1002/joc.950.
- Amri, Khairul. 2012. "Sinekologi Padang Lamun Akibat Tekanan Antropogenik: Studi Kasus Pulau Barranglompo Dan Bonebatang Kepulauan Spermonde Sulawesi Selatan." Institut Pertanian Bogor.
- Amri, Mohd Fazly, Khairul Nizam Abdul Maulud, Othman A. Karim, Rawshan Ara Begum, Md Firoz Khan, Wan Shafrina Wan Mohd Jaafar, Sharifah Mastura Syed Abdullah, Mohd Ekhwan Toriman, Mohd Khairul Amri Kamarudin, Muhammad Barzani Gasim, and Noorjima Abd Wahab. 2018. "An Assessment of Coastal Vulnerability of Pahang's Coast Due to Sea Level Rise." *International Journal of Engineering and Technology(UAE)* 7(3.14 Special Issue 14):176-80. doi: 10.14419/ijet.v7i3.14.16880.
- Amrutha, M. M., V. Sanil Kumar, and Jesbin George. 2017. "Observations of Long-Period Waves in the Nearshore Waters of Central West Coast of India during the Fall Inter-Monsoon Period." *Ocean Engineering* 131(1):244-62. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.01.014.
- Anderson, J. Marti. 2005. *PERMANOVA Permutational Multivariate Analysis of Variance A Computer Program*. University of Auckland.
- Anderson, Marti J. 2001. "A New Method for Non-Parametric Multivariate Analysis of Variance." *Austral Ecology* 26:32-64. doi: 10.1080/13645700903062353.
- Anderson, Marti J. 2017. "Permutational Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA)." *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online* 1-15. doi: 10.1002/9781118445112.stat07841.
- Anoop, T. R., V. Sanil Kumar, P. R. Shanas, and Glejin Johnson. 2015. "Surface Wave Climatology and Its Variability in the North Indian Ocean Based on ERA-Interim Reanalysis." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 32(7):1372-85. doi: 10.1175/JTECH-D-14-00212.1.
- Arbi, Ucu Yahu. 2012. "Komunitas Moluska Di Padang Lamun Pantai Wori, Sulawesi Utara." *Jurnal Bumi Lestari* 12(1):55-65.
- Arfiati, Diana, Endang Yuli Herawati, Nanik Retno Buwono, Aminuddin Firdaus, M. ... Winarno, and A. W. Puspitasari. 2019. "Struktur Komunitas Makrozoobentos Pada Ekosistem Lamun Di Paciran, Kabupaten Lamongan,



- Jawa Timur." *JFMR-Journal of Fisheries and Marine Research* 3(1):1–7. doi: 10.21776/ub.jfmr.2019.003.01.1.
- Arifin, and Jamaluddin Jompa. 2005. "Studi Kondisi Dan Potensi Ekosistem Padang Lamun Sebagai Daerah Asuhan Biota Laut." *Jurnal Ilmu-Ilmu Perairan Dan Perikanan Indonesia* 12(2):73–79.
- Armitage, Anna R., Thomas A. Frankovich, and James W. Fourqurean. 2011. "Long-Term Effects of Adding Nutrients to an Oligotrophic Coastal Environment." *Ecosystems* 14(3):430–44. doi: 10.1007/s10021-011-9421-2.
- Assa, Jerly D., Billy Th. Wagey, and Farnis B. Boneka. 2015. "Jenis-Jenis Ikan Di Padang Lamun Pantai Tongkaina." *Jurnal Pesisir Dan Laut Tropis* 3(2):53. doi: 10.35800/jplt.3.2.2015.10852.
- ASTM. 2017. "Astm D6913 Standard Test Methods for Particle-Size Distribution ( Gradation ) of Soils Using Sieve Analysis." *ASTM International* 1–35.
- Atmadipoera, Agus S., and Galang L. Mubaraq. 2016. "STRUKTUR DAN VARIABILITAS ARLINDO DI LAUT SULAWESI." *Jurnal Kelautan Nasional* 11(3):159–74.
- Azka, Muhamad Husni. 2006. "Ada Apa Dengan Lamun." *Oseana* 31(3):45–55.
- Badan Standardisasi Nasional. 2004. "SNI 06-6989.3-2004 Air Dan Air Limbah – Bagian 3: Cara Uji Padatan Tersuspensi Total (Total Suspended Solid, TSS) Secara Gravimetri." *Sni 06-6989.3-2004* 10.
- Badan Standardisasi Nasional. 2005. "SNI 06-6989.31-2005 Air Dan Air Limbah – Bagian 31 : Cara Uji Kadar Fosfat Dengan Spektrofotometer Secara Asam Askorbat." *Sni 06-6989.31* 1–10.
- Barba, Beatriz, Aitor Larra, Ainhoa Otermin, Ana Basaguren, Dpto Biolog, Fac Ciencia, and Universidad Pa. 2010. "The Effect of Sieve Mesh Size on the Description of Macroinvertebrate Communities Us Pozo Benthic Macroinvertebrates Are the Primary Group of Organisms Used in Stream Water Quality Moni- Be Negligible If the Variation of the Commu- Nity Parameters Was Kep." *Limnética* 29(2):211–19.
- Bjorndal, Karen A. 1980. "Nutrition and Grazing Behavior of the Green Turtle, Chelonia Mydas, a Seagrass Herbivore." University of Florida.
- Bjorndal, Karen A. 1985. "Nutritional Ecology of Sea Turtles." *Copeia* 1985(3):736.
- Blott, Simon J., and Kenneth Pye. 2001. "GRADISTAT: A Grain Size Distribution and Statistics Package for The Analysis of Unconsolidated Sediments." *Earth Surface Processes and Landforms* 26:1237–48. doi: 10.1002/esp.261.
- Blott, Simon J., and Kenneth Pye. 2012. "Particle Size Scales and Classification of Sediment Types Based on Particle Size Distributions: Review and Recommended Procedures." *Sedimentology* 59(7):1–26. doi: 10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x.
- BMKG. 2021. "Citra Radar." Retrieved (<https://www.bmkg.go.id/cuaca/citra-radar.bmkg>).
- Borst, Annieke C. W., Wilco C. E. P. Verberk, Christine Angelini, Jildou Schotanus, Jan Willem Wolters, Marjolijn J. A. Christianen, Els M. van der Zee, Marlous Derksen-Hooijberg, and Tjisse van der Heide. 2018. "Foundation Species Enhance Food Web Complexity through Non-Trophic Facilitation." *PLoS ONE* 13(8):1–15. doi: 10.1371/journal.pone.0199152.
- Ter Braak, C. J. F. 1986. "Canonical Correspondence Analysis: A New Eigenvector Technique for Multivariate Direct Gradient Analysis." *Ecology* 67(5):1167–79. doi: 10.2307/1938672.
- Ter Braak, C. J. F. 2002. *CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5)*. Microcomputer Power.



- Braak, Cajo J. F. 2011. "The History of Canonical Correspondence Analysis." 1–22.
- ter Braak, Cajo J. F., and Piet F. M. Verdonschot. 1995. "Canonical Correspondence Analysis and Related Multivariate Methods in Aquatic Ecology." *Aquatic Sciences* 57(3):255–89. doi: 10.1007/BF00877430.
- Brodersen, Kasper Elgetti., Kathrine J. Hammer, Verena. Schrameyer, Anja. Floytrup, Michael A. Rasheed, Peter J. Ralph, Michael. Kühl, and Ole Pedersen. 2017. "Sediment Resuspension and Deposition on Seagrass Leaves Impedes Internal Plant Aeration and Promotes Phytotoxic H<sub>2</sub>S Intrusion." *Frontiers in Plant Science* 8(May). doi: 10.3389/fpls.2017.00657.
- Brodersen, Kasper Elgetti., Klaus. Koren, Maria. Moßhammer, Peter J. Ralph, Michael. Kühl, and Jakob. Santner. 2017. "Seagrass-Mediated Phosphorus and Iron Solubilization in Tropical Sediments." *Environmental Science and Technology* 51(24):14155–63. doi: 10.1021/acs.est.7b03878.
- Brodersen, Kasper Elgetti., Daniel Aagren. Nielsen, Peter J. Ralph, and Michael. Kühl. 2015. "Oxic Microshield and Local PH Enhancement Protects *Zostera Muelleri* from Sediment Derived Hydrogen Sulphide." *New Phytologist* 205(3):1264–76. doi: 10.1111/nph.13124.
- Brodersen, Kasper Elgetti, Klaus Koren, Maria Moßhammer, Peter J. Ralph, Michael Kühl, and Jakob Santner. 2017. "Seagrass-Mediated Phosphorus and Iron Solubilization in Tropical Sediments." *Environmental Science and Technology* 51(24):14155–63. doi: 10.1021/acs.est.7b03878.
- Budimawan. 2014. "Perubahan Iklim Dan Ketersediaan Pangan." P. 14 in *Pembangunan Kawasan Timur Indonesia Dalam Konteks Kekinian Indonesia*, edited by D. Dachlan and S. Suhab. Makassar, Indonesia: Puslitbang Kebijakan dan Manajemen LPPM Universitas Hasanuddin.
- Burdige, D. J. 2012. *Estuarine and Coastal Sediments - Coupled Biogeochemical Cycling*. Vol. 5. Elsevier Inc.
- Buschman, F. A., A. J. F. Hoitink, S. M. De Jong, P. Hoekstra, H. Hidayat, and M. G. Sassi. 2012. "Suspended Sediment Load in the Tidal Zone of an Indonesian River." 4191–4204. doi: 10.5194/hess-16-4191-2012.
- Buschman, F. A., A. J. F. Hoitink, M. Van Der Vegt, and P. Hoekstra. 2010. "Subtidal Flow Division at a Shallow Tidal Junction." 46(December):1–12. doi: 10.1029/2010WR009266.
- Cappenberg, Hendrik Alexander William. 2006. "Pengamatan Komunitas Moluska Di Perairan Kepulauan Derawan, Kalimantan Timur." *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia* 39:75–87.
- Cappenberg, Hendrik Alexander William. 2007. "Sebaran Dan Kepadatan Kima (Tridacnidae) Di Perairan Kepulauan Derawan, Kalimantan Timur." *Journal of Fisheries Sciences* IX(2):220–25.
- Chaichitehrani, Nazanin, and Mohammad Nabi Allahdadi. 2018. "Overview of Wind Climatology for the Gulf of Oman and the Northern Arabian Sea." *American Journal of Fluid Dynamics* 8(1):1–9. doi: 10.5923/j.ajfd.20180801.01.
- Chang, C., and Tim Li. 2000. "TROPICAL TROPOSPHERIC BIENNIAL OSCILLATION AND ENSO." Pp. 167–79 in *East Asia and West Pacific Meteorology and Climate*.
- Chang, C. P., Patrick A. Harr, John McBride, and Huang Hsiung Hsu. 2004. "Maritime Continent Monsoon: Annual Cycle and Boreal Winter Variability." Pp. 107–50 in *The Global Monsoon System: Research and Forecast*. Vol. 1, edited by C. P. Chang, B. Wang, and N.-C. G. Lau. Geneva Switzerland: World Meteorological Organization.
- Chang, C. P., Z. Wang, and H. Hendon. 2006. "The Asian Winter Monsoon." Pp.



- 87–127 in *The Asian Monsoon*, edited by B. Wang. Chicester, UK: Springer and Praxis.
- Chang, C. P., Wang Zhuo, McBride John, and Liu Ching-Hwang. 2005. "Annual Cycle of Southeast Asia — Maritime Continent Rainfall and the Asymmetric." *Journal of Climate* 18:287–301. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-3257.1>.
- Chang, Chih-Pei, Bin Wang, and N. C. G. Lau. 2005. *The Global Monsoon System: Research and Forecast*. Vol. Volume 1.
- Christianen, M. J. A., T. van der Heide, T. J. Bouma, J. G. M. Roelofs, M. M. van Katwijk, and L. P. M. Lamers. 2011. "Limited Toxicity of NH<sub>x</sub> Pulses on an Early and Late Successional Tropical Seagrass Species: Interactions with PH and Light Level." *Aquatic Toxicology* 104(1–2):73–79. doi: 10.1016/j.aquatox.2011.04.002.
- Christianen, M. J. A., P. M. J. Herman, T. J. Bouma, L. P. M. Lamers, M. M. van Katwijk, T. van der Heide, P. J. Mumby, B. R. Silliman, S. L. Engelhard, M. van de Kerk, W. Kiswara, and J. van de Koppel. 2014. "Habitat Collapse Due to Overgrazing Threatens Turtle Conservation in Marine Protected Areas." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 281(1777):20132890–20132890. doi: 10.1098/rspb.2013.2890.
- Christianen, Marjolijn J. A. 2013. "Seagrass Systems Under Nutrient Loads and Grazing." Radboud University.
- Christianen, Marjolijn J. A., Jim van Belzen, Peter M. J. Herman, Marieke M. van Katwijk, Leon P. M. Lamers, Peter J. M. van Leent, and Tjeerd J. Bouma. 2013. "Low-Canopy Seagrass Beds Still Provide Important Coastal Protection Services." *PLoS ONE* 8(5). doi: 10.1371/journal.pone.0062413.
- Christianen, Marjolijn J. A., Laura L. Govers, Tjeerd J. Bouma, Wawan Kiswara, Jan G. M. Roelofs, Leon P. M. Lamers, and Marieke M. van Katwijk. 2012. "Marine Megaherbivore Grazing May Increase Seagrass Tolerance to High Nutrient Loads." *Journal of Ecology* 100(2):546–60. doi: 10.1111/j.1365-2745.2011.01900.x.
- Coastal Engineering Research Center. 1984. *SHORE PROTECTION MANUAL US Army Corps of Engineers*. Vol. I. Washington: Departement of The Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers.
- Colin, Patrick L., and Charles A. Arneson. 1995. *Tropical Pacific Invertebrates*. The Coral Reef Research Foundation.
- Connolly, Rod. 2009. "Seagrass." Pp. 1–14 in *A Marine Climate Change Impacts and Adaptation Report Card for Australia 2009*, edited by E. S. Poloczanska, A. J. Hobday, and A. J. Richardson. Queensland Australia: NCCARF.
- Connolly, Rod M., Emma L. Jackson, Peter I. Macreadie, Paul S. Maxwell, and Katherine R. O. Brien. 2018. *Seagrass Dynamics and Resilience*. Springer International Publishing.
- Cordy, J., and B. Cordy. 2006. "SNORKELING AND SCUBA DIVING." Pp. 41–44 in *The Mollusks: A Guide to Their Study, Collection, and Preservation*, edited by C. F. Sturm, T. A. Pearce, and A. Valdés. Pittsburgh USA: American Malacological Society.
- Costanza, Robert, Ralph D'Arge, Rudolf de Groot, Stephen Farber, Monica Grasso, Bruce Hannon, Karin Limburg, Shahid Naeem, Robert V. O'Neill, Jose Paruelo, Robert G. Raskin, Paul Sutton, and Marjan van den Belt. 1997. "The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital." *Nature* 387(15 May):253–60. doi: 10.1016/s0921-8009(98)00020-2.
- Costanza, Robert, Rudolf de Groot, Paul Sutton, Sander van der Ploeg, Sharolyn J. Anderson, Ida Kubiszewski, Stephen Farber, and R. Kerry Turner. 2014. "Changes in the Global Value of Ecosystem Services." *Global Environmental Change* 26(1):152–58. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002.



- Dambul, Ramzah. 2005. "The Relationships between Large-Scale Atmospheric Circulation and Surface Climate : A Case Study for Borneo." University of East Anglia Norwich, ENgland.
- Dambul, Ramzah. 2010. "Monsoon Indicators for Borneo." *Geografia : Malaysian Journal of Society and Space* 6(3):1-12.
- Dambul, Ramzah, and Phil Jones. 2007. "Regional and Temporal Climatic Classification for Borneo." *Geografia - Malaysian Journal of Society and Space* 3(1):84-105.
- Dermawan. 2015. *Pedoman Umum Identifikasi Dan Monitoring Populasi Teripang*. Jakarta Indonesia: KKP.
- Dharma, Bunjamin. 1988. *Siput Dan Kerang Indonesia (Indonesian Shells I)*. Jakarta Indonesia: PT. Sarana Graha.
- Dharma, Bunjamin. 1992. *Siput Dan Kerang Indonesia II Indonesian Shell II*. Wiesbaden Germany: Verlag Christa Hemmen.
- Dharma, Bunjamin. 2005. *Recent and Fossil Indonesian Shells*. Hackenheim, Germany: Conchbooks.
- Dijkstra, Henk H., and Robert G. Moolenbeek. 2008. "Some Pectinoidea (Bivalvia: Propeamussiidae and Pectinidae) from the Berau Islands (East Kalimantan, Indonesia)." *Venus* 67(1-2):15-26. doi: 10.18941/venus.67.1-2\_15.
- Donnelly, A. P., and R. A. Herbert. 1999. "Bacterial Interactions in the Rhizosphere of Seagrass Communities in Shallow Coastal Lagoons." *Journal of Applied Microbiology Symposium Supplement* 85(28). doi: 10.1111/j.1365-2672.1998.tb05294.x.
- Duarte, C. M., and H. Kirkman. 2001. "Methods for the Measurement of Seagrass Abundance and Depth Distribution." Pp. 141-53 in *Global Seagrass Research Methods*, edited by F. T. Short and R. G. Coles. Amsterdam: Elsevier Science B.V.,.
- Edgar, G. J., H. Mukai, and Robert J. Orth. 2001. "Fish, Crabs, Shrimps, and Other Large Mobile Epibenthos. Measurements Methods for Their Biomass and Abundance in Seagrass." Pp. 255-70 in *Global Seagrass Research Methods*, edited by F. T. Short and R. G. Coles. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V.
- Environmental Lakes. 2020. "{WRPLOT View – Air Dispersion Modelling}." Retrieved (<https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>).
- EPA. 1971. "Method 352.1: Nitrogen, Nitrate (Colorimetric , Brucine) by Spectrophotometer." 5.
- Erftemeijer, P. L. A., and J. J. Middelburg. 1993. "Sediment-Nutrient Interactions in Tropical Seagrass Beds - A Comparison between a Terrigenous and a Carbonate Sedimentary Environment in South Sulawesi (Indonesia)." *Marine Ecology Progress Series* 102(1-2):187-98. doi: 10.3354/meps102187.
- Erftemeijer, Paul L. A., and Peter M. J. Herman. 1994. "Seasonal Changes in Environmental Variables, Biomass, Production and Nutrient Contents in Two Contrasting Tropical Intertidal Seagrass Beds in South Sulawesi, Indonesia." *Oecologia* 99(1-2):45-59. doi: 10.1007/BF00317082.
- Evrard, Victor, Wawan Kiswara, Tjeerd J. Bouma, and Jack J. Middelburg. 2005. "Nutrient Dynamics of Seagrass Ecosystems: 15N Evidence for the Importance of Particulate Organic Matter and Root Systems." *Marine Ecology Progress Series* 295:49-55. doi: 10.3354/meps295049.
- Fadlan, Ahmad, Ricky D. Aror, Denny Nugoroho Sugianto, and Muhammad Zainuri. 2017. "Monthly Variation Characteristics of Wave Height in North Sulawesi." *Waste Technology* 5(1):21-26. doi: 10.12777/wastech.5.1.
- Fahmi, and Mohammad Adrim. 2009. "Diversitas Ikan Pada Komunitas Padang



- Lamun Pesisir Kepulauan Riau." *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia* 35(1):75–90.
- Fearn, P. R., L. Twomey, U. Zakiyah, S. Hellenen, W. Vincent, and M. J. Lynch. 2007. "The Hillarys Transect ( 3 ): Optical and Chlorophyll Relationships across the Continental Shelf off Perth." *Continental Shelf Research* 27:1719–46. doi: 10.1016/j.csr.2007.02.004.
- Feng, Ming, Ningning Zhang, Qinyan Liu, and Susan Wijffels. 2018. "The Indonesian Throughflow, Its Variability and Centennial Change." *Geoscience Letters* 5(1). doi: 10.1186/s40562-018-0102-2.
- Flemming, B. W. 1982. "Beach Morphodynamics in Relationship to Wave Energy, Grain Size and Internal Sedimentary Structure." (December 1982).
- Flemming, B. W. 2000. "The Role of Grain Size, Water Depth and Flow Velocity as Scaling Factors Controlling the Size of Subaqueous Dunes." *Marine Sandwave Dynamics* 154(March):55–60.
- Flemming, B. W. 2012. *Geology, Morphology, and Sedimentology of Estuaries and Coasts*. Vol. 3.
- Flemming, Burghard W. 2016. "Particle Shape-Controlled Sorting and Transport Behaviour of Mixed Siliciclastic/Bioclastic Sediments in a Mesotidal Lagoon, South Africa." *Geo-Marine Letters* 37(4):397–410. doi: 10.1007/s00367-016-0457-3.
- Flemming, Burghard W., and A. H. Fricke. 1983. "Sandy Beaches as Ecosystems." *Sandy Beaches as Ecosystems* (January 1983). doi: 10.1007/978-94-017-2938-3.
- Folk, R. L. 1974. "Petrologie of Sedimentary Rocks." *Hemphill Publishing Company, Austin* 170.
- Folk, R. L., and W. C. Ward. 1957. "Brazos River Bar [Texas]; a Study in the Significance of Grain Size Parameters." *Journal of Sedimentary Research* 27(1):3–26.
- Fourqurean, J. W., A. Willsie, C. D. Rose, and L. M. Rutten. 2001. "Spatial and Temporal Pattern in Seagrass Community Composition and Productivity in South Florida." *Marine Biology* 138(2):341–54. doi: 10.1007/s002270000448.
- Fourqurean, James. 2020. *Habitats Seagrasses*.
- Fourqurean, James W. 2014. "FKNMS Benthic Habitat Monitoring Program." 41.
- Fourqurean, James W., Thomas O. Moore, Brian Fry, and James T. Hollibaugh. 1997. "Spatial and Temporal Variation in C:N:P Ratios,  $\Delta^{15}\text{N}$ , and  $\Delta^{13}\text{C}$  of Eelgrass *Zostera Marina* as Indicators of Ecosystem Processes, Tomales Bay, California, USA." *Marine Ecology Progress Series* 157:147–57. doi: 10.3354/meps157147.
- Fourqurean, James W., and Leanne. M. Rutten. 2003. "Chapter 10 Competing Goals of Spatial and Temporal Resolution: Monitoring Seagrass Communities on a Regional Scale." Pp. 257–88 in *Monitoring Ecosystems Interdisciplinary Approach for Evaluating Ecoregional initiatives*, edited by D. E. Busch and J. C. Trexler. Washington: Island Press.
- Fourqurean, Jim. 1995. "Seagrass Meadows and Nutrients."
- Fuad, M. A. Z., Abu Bakar Sambah, and Daduk Setyohadi. 2012. *Modul Bahan Ajar Meteorologi Laut*. Malang, Indonesia: FPIK UB.
- Garcias-Bonet, Neus, Marco Fusi, Muhammad Ali, Dario R. Shaw, Pascal E. Saikaly, Daniele Daffonchio, and Carlos M. Duarte. 2018. "High Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation Contributes to Net Nitrogen Loss in a Seagrass Ecosystem in the Central Red Sea." *Biogeosciences* 15(23):7333–46. doi: 10.5194/bg-15-7333-2018.
- Gartner, A., P. S. Lavery, K. McMahon, A. Brearley, and H. Barwick. 2010. "Light



- Reductions Drive Macroinvertebrate Changes in Amphibolis Griffithii Seagrass Habitat." *Marine Ecology Progress Series* 401(February):87–100. doi: 10.3354/meps08367.
- Gartner, A., F. Tuya, P. S. Lavery, and K. McMahon. 2013. "Habitat Preferences of Macroinvertebrate Fauna among Seagrasses with Varying Structural Forms." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 439:143–51. doi: 10.1016/j.jembe.2012.11.009.
- Garzanti, Eduardo. 2017. "The Maturity Myth in Sedimentology and Provenance Analysis." *Journal of Sedimentary Research* 87(4):353–65. doi: 10.2110/jsr.2017.17.
- Geiger, Daniel L., Bruce A. Marshall, Winston F. Ponder, Takenori Sasaki, and Anders Warén. 2007. "Techniques for Collecting, Handling, Preparing, Storing and Examining Small Molluscan Specimens." *Molluscan Research* 27(1):1–50.
- Gordon, Arnold L. 2005. "Oceanography of the Indonesian Seas and Their Throughflow." *Oceanography* 18(SPL.ISS. 4):15–27. doi: 10.5670/oceanog.2005.01.
- van Gorsel, J. T. 2018. *Bibliography of the Geology of Indonesia and Surrounding Areas*. 7.0. www.vangorselist.com.
- Govers, Laura L., Wouter Suykerbuyk, Jacqueline H. T. Hoppenreijns, Kris Giesen, Tjeerd J. Bouma, and Marieke M. Van Katwijk. 2014. "Rhizome Starch as Indicator for Temperate Seagrass Winter Survival." *Ecological Indicators* 49:53–60. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.10.002.
- Green, Edmund P., and Frederick T. Short. 2003. *World Atlas of Seagrasses*. London, England: UNEP-WCMC.
- Greenacre, Michael, and Raul Primicerio. 2013. *Multivariate Analysis of Ecological Data*. Bilbao Spain: Fundación BBVA.
- Hall, R. 2018. "Plate Tectonic Reconstructions of the Indonesian Region." doi: 10.29118/ipa.464.71.84.
- Hall, Robert. 2013. "The Palaeogeography of Sundaland and Wallacea since the Late Jurassic." *Journal of Limnology* 72(S2):1–17. doi: 10.4081/jlimnol.2013.s2.e1.
- Hall, Robert. 2017. "Southeast Asia: New Views of the Geology of the Malay Archipelago." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 45(May):331–58. doi: 10.1146/annurev-earth-063016-020633.
- Hall, Robert, and Gary Nichols. 2002. "Cenozoic Sedimentation and Tectonics in Borneo." *Geological Society, London, Special Publications* 191(1):5–22.
- Hamada, Jun Ichi, Manabu D. Yamanaka, Jun Matsumoto, Shoichiro Fukao, Paulus Agus Winarso, and Tien Sribimawati. 2002. "Spatial and Temporal Variations of the Rainy Season over Indonesia and Their Link to ENSO." *Journal of the Meteorological Society of Japan* 80(2):285–310. doi: 10.2151/jmsj.80.285.
- Hammer, Øyvind., and David A. T. Harper. 2006. *Paleontological Data Analysis*. Vol. 1. Blackwell Publishing.
- Hammer, Øyvind., David A. T. Harper, and Paul. D. Ryan. 2001. "PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis." *Palaeontologia Electronica* 4(1):9pp.
- Hamsiah, Endang Y. Herawati, Mohammad Mahmudi, and Aida Sartimbul. 2016. "Seasonal Variation of Bivalve Diversity in Seagrass Ecosystem of Labakkang Coastal Water, Pangkep, South Sulawesi, Indonesia." *AACL Bioflux* 9(4):775–84.
- Hamza, Waleed, Letizia Lusito, and Felice D. Alessandro. 2018. "Wave Climate at Shallow Waters along the Abu Dhabi Coast." *Water* 10(985):1–19. doi:



- 10.3390/w10080985.
- Hann. 1908. "Handbuch Der Klimatologie." 1.
- Harguinteguy, Carlos A., M. Noelia Cofré, and Catalina T. Pastor De Ward. 2012. "Change in the Meiofauna Community Structure of Sandy Beaches of the Nuevo Gulf (Chubut, Argentina)." *Papeis Avulsos de Zoologia* 52(34):411–22. doi: 10.1590/S0031-10492012021400001.
- den Hartog, C. 1970. *The Sea-Grasses of the World*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
- den Hartog, C., and John Kuo. 2006. *Chapter 1 Taxonomy and Biogeography of Seagrasses*.
- Hasanudin, M. 1998. "Arus Lintas Indonesia (Arlindo)." *Oseana* 23(2):1–9.
- Hasniar, Magdalena Litaay, and Dody Priosambodo. 2013. "Biodiversitas Gastropoda Di Padang Lamun Perairan Mara'bombang Kabupaten Pinrang Sulawesi Selatan." *Torani* 23(3):127–36.
- van der Heide, Tjisse, Johan S. Eklöf, Egbert H. van Nes, Els M. van der Zee, Serena Donadi, Ellen J. Weerman, Han Olf, and Britas Klemens Eriksson. 2012. "Ecosystem Engineering by Seagrasses Interacts with Grazing to Shape an Intertidal Landscape." *PLoS ONE* 7(8):14–16. doi: 10.1371/journal.pone.0042060.
- Heip, C. 1974. "A New Index Merasuring Evenness." *J. Mar. Biol Ass* 54:555–57.
- Heithaus, Michael R., Teresa Alcoverro, Rohan Arthur, Derek A. Burkholder, Kathryn A. Coates, Marjolijn J. A. Christianen, Nachiket Kelkar, Sarah A. Manuel, Aaron J. Wirsing, W. Judson Kenworthy, and James W. Fourqurean. 2014. "Seagrasses in the Age of Sea Turtle Conservation and Shark Overfishing." *Frontiers in Marine Science* 1(August):1–6. doi: 10.3389/fmars.2014.00028.
- Hemminga, Marten A., and Carlos M. Duarte. 2000. *Seagrass Ecology*.
- Hendriks, Iris E., Miguel Cabanellas-Reboredo, Tjeerd J. Bouma, Salud Deudero, and Carlos M. Duarte. 2011. "Seagrass Meadows Modify Drag Forces on the Shell of the Fan Mussel *Pinna Nobilis*." *Estuaries and Coasts* 34(1):60–67. doi: 10.1007/s12237-010-9309-y.
- Hermawan, Eddy. 2010. "The Preliminary Result On Determining of Indonesia Monsoon Index Based on The Equatorial Atmosfer Radar (EAR) Data Analysis." Pp. 8–17 in *Prosiding Seminar Penerbangan dan Antariksa 2012. Sub Seminar Sains Atmosfer dan Iklim*. Tangerang.
- Hernández, Ana L. Molin., and Brigitta I. Van Tussenbroek. 2014. "Patch Dynamics and Species Shifts in Seagrass Communities under Moderate and High Grazing Pressure by Green Sea Turtles." *Marine Ecology Progress Series* 517(December):143–57. doi: 10.3354/meps11068.
- Hernawan, Udhi E., Susi Rahmawati, Rohani Ambo-Rappe, Nurul D. M. Sjafrie, Hadiyanto Hadiyanto, Deny S. Yusup, Aditya H. Nugraha, Yuyu A. La Nafie, Wahyu Adi, Bayu Prayudha, Andri Irawan, Yusmiana P. Rahayu, Ermi Ningsih, Ita Riniatsih, Indarto H. Supriyadi, and Kathryn McMahon. 2021. "The First Nation-Wide Assessment Identifies Valuable Blue-carbon Seagrass Habitat in Indonesia Is in Moderate Condition." *Science of The Total Environment* 782:146818. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146818.
- Heryanto, and A. W. Radjab. 2014. "Dinamika Populasi *Atactodea Striata* (Gmelin, 1791) (Mollusca: Mesodesmatidae) Di Pantai Berpasir Ohoider, Kep. Kei Kecil, Maluku Tenggara." *Jurnal Biologi Indonesia* 10(1):57–65.
- Hidayati, Nurin. 2017. *Dinamika Pantai*. Malang, Indonesia: UB Press.
- Hidayati, S., E. Guritno, A. Argenton, W. Ziza, and I. del Campana. 2011. "Re-Visited Structural Framework of the Tarakan Sub-Basin Northeast Kalimantan – Indonesia." in *31st Annual Convention Proceedings of*



*Indonesian Petroleum Association.*

- Holmer, Marianne, Dave Wildish, and Barry Hargrave. 2005. "Organic Enrichment from Marine Finfish Aquaculture and Effects on Sediment Biogeochemical Processes." *Environmental Effects of Marine Finfish Aquaculture* 5 Part M(October):1–26. doi: 10.1007/b136010.
- Holthuijsen, Leo H. 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. eBook. New York: Cambridge University Press.
- Hu, Xiaoyue, Janet Sprintall, Dongliang Yuan, Benoît Tranchant, Philippe Gaspar, Ariane Koch-Larrouy, Guillaume Refray, Xiang Li, Zheng Wang, Yao Li, Dwiyo Nugroho, Corry Corvianawatie, and Dewi Surinati. 2019. "Interannual Variability of the Sulawesi Sea Circulation Forced by Indo-Pacific Planetary Waves." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 124(3):1616–33. doi: 10.1029/2018JC014356.
- Hung Liu, Ha Trieu, Dominik Kneer, Harald Asmus, and Harald Ahnelt. 2008. "The Feeding Habits of *Austrolethops Wardi*, a Gobiid Fish Inhabiting Burrows of the Thalassinidean Shrimp *Neaxius Acanthus*." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 79(4):764–67. doi: 10.1016/j.ecss.2008.06.020.
- Hyndes, Glenn A., Patrice Francour, Paolo Guidetti, Kenneth L. Heck Jr, and Gregory Jenkins. 2018. *The Roles of Seagrasses in Structuring Associated Fish Assemblages and Fisheries*. Springer International Publishing.
- Imran, A. M., M. Farida, M. F. Arifin, R. Husain, and A. Hafidz. 2016. "Reef Development as an Indicator of Sea Level Fluctuation: A Preliminary Study on Pleistocene Reef in Bulukumba, South Sulawesi." *Indonesian Journal on Geoscience* 3(1):53–66. doi: 10.17014/ijog.3.1.53-66.
- Iqbal, Kemal, Zulfaidah Penata Gama, and Bagyo Yanuwadi. 2015. "Spatial Distribution of Birds in Coban Trisula, Bromo Tengger Semeru National Park." Pp. 26–30 in *6th International Conference on Global Resources Conservation (ICGRC)*.
- Iskandar, Iskhaq, Wijaya Mardiansyah, Deni Okta Lestari, and Yukio Masumoto. 2020. "What Did Determine the Warming Trend in the Indonesian Sea?" *Progress in Earth and Planetary Science* 7(1):11. doi: 10.1186/s40645-020-00334-2.
- Islami, Muhammad Masrur. 2015. "Aktifitas Menggali Pada Bivalvia." *Oseana* XL(1):11–18. doi: ISSN 0216-1877.
- Isnoor, K. F. N., P. U. Firdianto, and H. A. Rejeki. 2019. "The Activity of Borneo Vortex as a Trigger for Extreme Rain in West Borneo ( Case Study : 24th – 25th January 2017 ) The Activity of Borneo Vortex as a Trigger for Extreme Rain in West Borneo ( Case Study : 24th – 25th January 2017 )." Pp. 1–9 in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Tropical Meteorology and Atmospheric Sciences*. IOP Publishing.
- Jagodziński, Robert, Beata Sternal, Witold Szczuciński, Catherine Chagué-Goff, and Daisuke Sugawara. 2012. "Heavy Minerals in the 2011 Tohoku-Okii Tsunami Deposits-Insights into Sediment Sources and Hydrodynamics." *Sedimentary Geology* 282:57–64. doi: 10.1016/j.sedgeo.2012.07.015.
- Jalil, Abdul Rasyid, Muhammad Farid Samawi, Hasni Y. Azis, Andi Imran Anshari, Ilham Jaya, and Abdul Malik. 2020. "Prosiding Simposium Nasional VII Kelautan Dan Perikanan 2020 Fakultas Ilmu Kelautan Dan Perikanan, Universitas Hasanuddin, Makassar, 5 Juni 2020 155." Pp. 1–10 in *Prosiding Simposium Nasional VII Kelautan dan Perikanan*. Makassar.
- Jamil, Tahira, Carla Kruk, and Cajo J. F. Ter Braak. 2014. "A Unimodal Species Response Model Relating Traits to Environment with Application to Phytoplankton Communities." *PLoS ONE* 9(5). doi:



- 10.1371/journal.pone.0097583.
- Jankowska, Emilia, W. Maria, Lech Kotwicki, Piotr Balazy, and Karol Kulinski. 2014. "Estuarine , Coastal and Shelf Science Seasonality in Vegetation Biometrics and Its Effects on Sediment Characteristics and Meiofauna in Baltic Seagrass Meadows Ski." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 139:159–70. doi: 10.1016/j.ecss.2014.01.003.
- Jarvis, S. C., N. V Proctor, and W. A. Musk. 2004. *Rapid Assessment of Macroinvertebrate Samples*. Peterborough.
- John, Beena Mary, Kiran G. Shirlal, and Subba Rao. 2019. "Laboratory Investigations of Wave Attenuation by Simulated Vegetation of Varying Densities." *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 25(2):203–13. doi: 10.1080/09715010.2017.1398112.
- Jost, Lou. 2010. "The Relation between Evenness and Diversity." *Diversity* 2(2):207–32. doi: 10.3390/d2020207.
- Kanhaiya, S., B. P. Singh, Maya Tripathi, Sagrika Sahu, and Veena Tiwari. 2017. "Lithofacies and Particle-Size Characteristics of Late Quaternary Floodplain Deposits along the Middle Reaches of the Ganga River, Central Ganga Plain, India." *Geomorphology* 284:220–28. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.08.030.
- Kao, Yu Hsiee, and S. Y. Xu. 1962. "Some Problems on the Monsoons of East Asia." *Collect. Papers Inst. Geophys. Meteorol., Acad. Sinica* 5. (October).
- van Katwijk, M. M., M. E W van der Welle, E. C. H. E. T. Lucassen, J. A. Vonk, M. J. A. Christianen, W. Kiswara, I. Inayat al Hakim, A. Arifin, T. J. Bouma, J. G. M. Roelofs, and L. P. M. Lamers. 2011. "Early Warning Indicators for River Nutrient and Sediment Loads in Tropical Seagrass Beds: A Benchmark from a near-Pristine Archipelago in Indonesia." *Marine Pollution Bulletin* 62(7):1512–20. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.04.007.
- van Katwijk, M. M., M. E.W. van der Welle, E. C. H. E. T. Lucassen, J. A. Vonk, M. J. A. Christianen, W. Kiswara, I. Inayat al Hakim, A. Arifin, T. J. Bouma, J. G. M. Roelofs, and L. P. M. Lamers. 2011. "Early Warning Indicators for River Nutrient and Sediment Loads in Tropical Seagrass Beds: A Benchmark from a near-Pristine Archipelago in Indonesia." *Marine Pollution Bulletin* 62(7):1512–20. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.04.007.
- Khasanah, Ruly Isfatul, Aida Sartimbul, and Yuli Herawati. 2013. "Kelimpahan Dan Keanekaragaman Plankton Di Perairan Selat Bali Kelimpahan Dan Keanekaragaman Plankton Di Perairan Selat Bali." *Ilmu Kelautan* 18(4):193–202. doi: 10.14710/ik.ijms.18.4.193-202.
- Khoirunnisa, Hanah, Muhammad Zainuddin Lubis, and Wenang Anurogo. 2017. "The Characteristics of Significant Wave Height and Sea Surface Temperature In The Sunda Strait." *Journal of Applied Geospatial Information* 1(01):19–25. doi: 10.30871/jagi.v1i01.338.
- Khromov, S. P. 1957. "Die Geographische Verbreitung Der Monsune." *Peterm. Geogr. Mitt.* 1957, S. 234–237. Retrieved (<https://de.wikipedia.org/wiki/Monsunkriterien>).
- Kilminster, Kiernyn, Kathryn McMahon, Michelle Waycott, Gary A. Kendrick, Peter Scanes, Len McKenzie, Katherine R. O'Brien, Mitchell Lyons, Angus Ferguson, Paul Maxwell, Tim Glasby, and James Udy. 2015. "Unravelling Complexity in Seagrass Systems for Management: Australia as a Microcosm." *Science of the Total Environment* 534:97–109. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.061.
- Kiswara, Wawan, and Malikusworo Hutomo. 1985. "Hutomo - 1985 (Lamun).Pdf." *Oseana* X(1):21–30.
- Kneer, Dominik, Harald Asmus, H. Ahnelt, and Jan Arie Vonk. 2008. "Records of



- Austrolethops Wardi Whitley ( Teleostei : Gobiidae ) as an Inhabitant of Burrows of the Thalassinid Shrimp Neaxius Acanthus in Tropical Seagrass Beds of the Spermonde Archipelago , Sulawesi , Indonesia.” *Journal of Fish Biology* 72:1095–99. doi: 10.1111/j.1095-8649.2007.01775.x.
- Kneer, Dominik, Harald Asmus, and Jan Arie. 2008. “Estuarine , Coastal and Shelf Science Seagrass as the Main Food Source of Neaxius Acanthus ( Thalassinidea : Strahlaxiidae ), Its Burrow Associates , and of Corallianassa Coutierei ( Thalassinidea : Callianassidae ).” 79:620–30. doi: 10.1016/j.ecss.2008.05.013.
- Kneer, Dominik, Harald Asmus, and Jamaluddin Jompa. 2013. “Journal of Experimental Marine Biology and Ecology Do Burrowing Callianassid Shrimp Control the Lower Boundary of Tropical Seagrass Beds ?” *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 446:262–72. doi: 10.1016/j.jembe.2013.05.023.
- Koch, Evamaria W., Josef D. Ackerman, Jennifer Verduin, and Michael van Keulen. 2006. “Fluid Dynamics in Seagrass Ecology-from Molecules to Ecosystems.” Pp. 193–225 in *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*, edited by A. W. D. Larkum, R. J. Orth, and C. M. Duarte. Springer.
- Van De Koppel, Johan, Tjisse Van Der Heide, Andrew H. Altieri, Britas Klemens Eriksson, Tjeerd J. Bouma, Han Olf, and Brian R. Silliman. 2015. “Long-Distance Interactions Regulate the Structure and Resilience of Coastal Ecosystems.” *Annual Review of Marine Science* 7:139–58. doi: 10.1146/annurev-marine-010814-015805.
- Koseki, S., Tieh Yong Koh, and C. K. Teo. 2014. “Borneo Vortex and Mesoscale Convective Rainfall.” *Atmospheric Chemistry and Physics* 14:4539–62. doi: 10.5194/acp-14-4539-2014.
- Kreemer, Corn , William E. Holt, and A. John Haines. 2003. “An Integrated Global Model of Present-Day Plate Motions and Plate Boundary Deformation.” *Geophysical Journal International* 154(1):8–34. doi: 10.1046/j.1365-246X.2003.01917.x.
- Kruskal, J. B. 1964. “Multidimensional Scaling by Optimizing Goodness of Fit to a Nonmetric Hypothesis.” *Psychometrika* 29(1):1–27. doi: 10.5137/1019-5149.JTN.14036-15.1.
- Kumar, Sanil V., and Jesbin George. 2016. “Influence of Indian Summer Monsoon Variability on the Surface Waves in the Coastal Regions of Eastern Arabian Sea.” *Annales Geophysicae* 34(10):871–85. doi: 10.5194/angeo-34-871-2016.
- Kuo, J., M. L. Cambridge, and H. Kirkman. 2018. “Anatomy and Structure of Australian Seagrasses.” Pp. 93–125 in. Springer International Publishing.
- Kuo, John. 2007. “New Monoecious Seagrass of Halophila Sulawesii (Hydrocharitaceae) from Indonesia.” *Aquatic Botany* 87(2):171–75. doi: 10.1016/j.aquabot.2007.04.006.
- Kurniawan, Andi. 2018. *Ekologi Sistem Akuatik Fundamen Dalam Pemanfaatan Dan Pelestarian Lingkungan Perairan*. Malang, Indonesia: UB Press.
- Kusnadi, Agus, Teddy Triandiza, and Udhi E. Hernawan. 2008. “The Inventory of Mollusc Species and Its Potent on Seagrass Bed in Kei Kecil Islands, Southeast Moluccas.” *Biodiversitas Journal of Biological Diversity* 9(1):30–34. doi: 10.13057/biodiv/d090108.
- Kv lseth, Tarald O. 2015. “Evenness Indices Once Again: Critical Analysis of Properties.” *SpringerPlus* 4(232). doi: 10.1186/s40064-015-0944-4.
- Lal, Aparna, R. Arthur, N ria Marbà, Adrian W. T. Lill, and Teresa Alcoverro. 2010. “Implications of Conserving an Ecosystem Modifier: Increasing Green



- Turtle (*Chelonia Mydas*) Densities Substantially Alters Seagrass Meadows." *Biological Conservation* 143(11):2730–38. doi: 10.1016/j.biocon.2010.07.020.
- Laning, Timothy Herman, Deny Suherawan Yusup, and Joko Wiryanto. 2015. "Sebaran Bulu Babi (*Echinoidea*) Di Kawasan Padang Lamun Pantai Merta Segara, Sanur-Bali." *Jurnal Biologi* 18(2):41–45.
- Lanuru, Mahatma, Rohani Ambo-Rappe, Khairul Amri, and Susan L. Williams. 2018. "Hydrodynamics in Indo-Pacific Seagrasses with a Focus on Short Canopies." *Botanica Marina* 61(1):1–8. doi: 10.1515/bot-2017-0037.
- Lapointe, B. E., D. A. Tomasko, and W. R. Matzie. 1994. "Eutrophication and Trophic State Classification of Seagrass Communities in the Florida Keys." *Bulletin of Marine Science* 54(3):696–717.
- Larkum, Anthony W. D., Robert J. Orth, and Carlos M. Duarte. 2006. *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Latuconsina, Husain, and Rohani Ambo-rape. 2013. "Variabilitas Harian Komunitas Ikan Padang Lamun Perairan Tanjung Tiram-Teluk Ambon Dalam [ Daily Variability of Fish Community in Sea Grass Beds of Tanjung Tiram-Inner Ambon Bay ] Masyarakat Iktiologi Indonesia." *Jurnal Iktiologi Indonesia* 13(1):2010.
- Latuconsina, Husain, M. Nessa, and Rohani Ambo-Rappe. 2012. "Komposisi Spesies Dan Struktur Komunitas Ikan Padang Lamun Di Perairan Tanjung Tiram – Teluk Ambon Dalam." *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis* 4(1):35–46.
- Lau, N. C. G., and Bin Wang. 2005. "Monsoon-ENSO Interactions." Pp. 299–312 in *The Global Monsoon System: Research and Forecast*, edited by C. P. Chang, B. Wang, and N.-C. G. Lau. Geneva Switzerland: World Meteorological Organization.
- Lee, Sukyoung. 1999. "Why Are the Climatological Zonal Winds Easterly in the Equatorial Upper Troposphere?" *Journal of the Atmospheric Sciences* 56(10):1353–64. doi: 10.1175/1520-0469(1999)056<1353:watczw>2.0.co;2.
- Legendre, P., and M. J. Anderson. 1999. "Erratum: Distance-Based Redundancy Analysis: Testing Multispecies Responses in Multifactorial Ecological Experiments: (Ecological Monographs (1999) 69:1 (1-24))." *Ecological Monographs* 69(4):512. doi: 10.2307/2657228.
- Legendre, Pierre. 2018a. "A Brief History of the Development of Numerical Ecology." 54.
- Legendre, Pierre. 2018b. "Canonical Analysis." *Biometrical Journal* 75.
- Legendre, Pierre, and Louis Legendre. 2003. *Numerical Ecology*. Vol. 20. Third Engl. Amsterdam: Elsevier Science B.V.
- Legendre, Pierre, and Louis Legendre. 2012. "Chapter 11 Canonical Analysis." Pp. 575–99 in *Developments in Environmental Modelling*, edited by P. Legendre and L. Legendre. Amsterdam: Elsevier Science B.V.
- Leung, Kenneth M. Y., Katie W. Y. Yeung, Jing You, Kyungho Choi, Xiaowei Zhang, Ross Smith, Guang Jie Zhou, Mana M. N. Yung, Carlos Arias-Barreiro, Youn Joo An, S. Rebekah Burket, Robert Dwyer, Nathalie Goodkin, Yii Siang Hii, Tham Hoang, Chris Humphrey, Chuleemas Boonthai Iwai, Seung Woo Jeong, Guillaume Juhel, Ali Karami, Katerina Kyriazi-Huber, Kuan Chun Lee, Bin Le Lin, Ben Lu, Patrick Martin, Mae Grace Nillos, Katharina Oginawati, I. V. N. Rathnayake, Yenny Risjani, Mohammad Shoeb, Chin Hon Tan, Maria Claret Tsuchiya, Gerald T. Ankley, Alistair B. A. Boxall, Murray A. Rudd, and Bryan W. Brooks. 2020. "Toward Sustainable Environmental Quality: Priority Research Questions for Asia." *Environmental*



- Toxicology and Chemistry* 39(8):1485–1505. doi: 10.1002/etc.4788.
- Litaay, Magdalena. 2018. "Marine Tunicates from Sangkarang Archipelago Indonesia: Recent Finding and Bio-Prospecting." *Journal of Physics: Conference Series* 979(1). doi: 10.1088/1742-6596/979/1/012003.
- Litaay, Magdalena, Dody Priosambodo, Harald Asmus, and Amrullah Saleh. 2007. "Makrozoobentos Yang Berasosiasi Dengan Padang Lamun Di Perairan Pulau Barrang Lompo, Makassar, Sulawesi Selatan." *Berita Biologi* 8(4):299–305.
- de Longh, H. H., W. Kiswara, W. Kustiawan, and P. E. Loth. 2007. "A Review of Research on the Interactions between Dugongs (Dugong Dugon Müller 1776) and Intertidal Seagrass Beds in Indonesia." *Hydrobiologia* 591(1):73–83. doi: 10.1007/s10750-007-0785-4.
- López, Isis Gabriela Martínez, Marloes Van Den Akker, Liene Walk, Marieke M. Van Katwijk, Tjisse Van Der Heide, and Brigitta I. Van Tussenbroek. 2019. "Nutrient Availability Induces Community Shifts in Seagrass Meadows Grazed by Turtles." *PeerJ* 2019(9):1–21. doi: 10.7717/peerj.7570.
- Luhar, M., E. Infantes, and H. Nepf. 2017. "Seagrass Blade Motion Under Waves and Its Impact on Wave Decay." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 122:1–22. doi: 10.1002/2016JC012264. Received.
- Lukman, Adamu M., Rufai Ayuba, and Tope S. Alege. 2018. "Sedimentology and Depositional Environments of the Maastrichtian Mamu Formation, Northern Anambra Basin, Nigeria." 9(2):53–68. doi: 10.9790/0990-0601013851.
- Mabidi, Annah, Matthew S. Bird, and Renzo Perissinotto. 2017. "Distribution and Diversity of Aquatic Macroinvertebrate Assemblages in a Semiarid Region Earmarked for Shale Gas Exploration (Eastern Cape Karoo, South Africa)." *PLoS ONE* 12(6):1–27. doi: 10.1371/journal.pone.0178559.
- Madden, Roland A., and Paul R. Julian. 1971. "Detection of a 40-50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific." *Journal of the Atmospheric Sciences* 28:702–8.
- Madduppa, Hawis H. 2007. "Modul Pelatihan : Teknik Analisis Kuantitatif Data Biologi Laut." 23.
- Madsen, J. D., P. A. Chambers, W. F. James, E. W. Koch, and D. F. Westlake. 2001. "The Interaction between Water Movement, Sediment Dynamics and Submersed Macrophytes." *Hydrobiologia* 444:71–84. doi: 10.1023/A:1017520800568.
- Mancinelli, Giorgio, Maurizio Pinna, and Alberto Basset. 2008. "Spatio-Temporal Variability of Macrozoobenthos Size Structure of a Coastal Lagoon: The Influence of Spectrum Resolution." *Transitional Waters Bulletin* 2(2):81–92. doi: 10.1285/i1825229Xv1n4p81.
- Marasabessy, M. D. 2010. "Sumberdaya Ikan Di Daerah Padang Lamun Pulau-Pulau Derawan, Kalimantan Timur." *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia* 36(2):193–210.
- Marbà, Núria, Carlos M. Duarte, Jorge Terrados, Zayda Halun, Esperança Gacia, and Miguel D. Fortes. 2010. "Effects of Seagrass Rhizospheres on Sediment Redox Conditions in SE Asian Coastal Ecosystems." *Estuaries and Coasts* 33(1):107–17. doi: 10.1007/s12237-009-9250-0.
- Marina, Pablo, Javier Urra, José L. Rueda, and Carmen Salas. 2012. "Composition and Structure of the Molluscan Assemblage Associated with a Cymodocea Nodosa Bed in South-Eastern Spain : Seasonal and Diel Variation." *Helgol Mar Res* 66:585–99. doi: 10.1007/s10152-012-0294-3.
- Martono. 2014. "Seasonal and Interannual Variations of Sea Surface Temperature in the Indonesian Waters." *Forum Geografi* 30(2):120–29.
- Maryanto, Sigit. 2012. "Diagenesis and Provenance of Lati Sandstones in the



- Berau Area, East Kalimantan Province, Based on Petrography Data." *Indonesian Journal on Geoscience* 7(3):145–56.
- Mathews, E., Heap, A., Woods, M. 2007. "Inter-Reefal Seabed Sediments and Geomorphology of the Great Barrier Reef, a Spatial Analysis." *Geoscience Australia, Canberra, Australia* 212.
- Matsumoto, Jun, Lyndon Mark P. Olaguera, Dzung Nguyen-Le, Hisayuki Kubota, and Marcelino Q. Villafuerte. 2020. "Climatological Seasonal Changes of Wind and Rainfall in the Philippines." *International Journal of Climatology* 40(11):4843–57. doi: 10.1002/joc.6492.
- Maxwell, Paul S., Johan S. Eklöf, Marieke M. van Katwijk, Katherine R. O'Brien, Maricela de la Torre-Castro, Christoffer Boström, Tjeerd J. Bouma, Dorte Krause-Jensen, Richard K. F. Unsworth, Brigitta I. van Tussenbroek, and Tjisse van der Heide. 2017. "The Fundamental Role of Ecological Feedback Mechanisms for the Adaptive Management of Seagrass Ecosystems – a Review." *Biological Reviews* 92(3):1521–38. doi: 10.1111/brv.12294.
- McKenzie, L. J., and Campbell. S. J. 2002. *Seagrass-Watch: Manual for Community (Citizen) Monitoring of Seagrass Habitat. Western Pacific Edition*. Cairns, Queensland 4870 Australia: Marine Plant Ecology Group, QDPI, Northern Fisheries Centre.
- McKenzie, Len. 2008. *Seagrass Educators Handbook*. Cairns, Queensland 4870 Australia: Seagrass-Watch.
- Mckenzie, Len J., Siti Maryam Yaakub, Ria Tan, Jamie Seymour, and Rudi L. Yoshida. 2016. "Seagrass Habitats of Singapore: Environmental Drivers and Key Processes Seagrass Habitats of Singapore: Environmental Drivers and Key Processes." *Raffles Bulletin of Zoology* 34(July):60–77.
- McLaren, P., and D. Bowles. 1985. "The Effects of Sediment Transport on Grain-Size Distributions." *Journal of Sedimentary Petrology* 55(4):457–70. doi: 10.1306/212F86FC-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- McLaren, Patrick. 2014. "Sediment Trend Analysis (STA®): Kinematic vs. Dynamic Modeling." *Journal of Coastal Research* 30(3):429–37. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-13-00121.1.
- McNaughton, S. J., and Michael B. Coughenour. 1981. "The Cybernetic Nature of Ecosystems." *The American Naturalist* 117(6):985–90. doi: 10.1086/283782.
- Meirinawati, Hanny. 2017. "Transformasi Nitrogen Di Laut." *Oseana XLII*(1):36–46.
- Moiola, R.J., and Weiser, D. 1968. "Textural Parameters: An Evaluation: ERRATUM." *SEPM Journal of Sedimentary Research* Vol. 38(1). doi: 10.1306/74d71ad2-2b21-11d7-8648000102c1865d.
- Moran, Kathleen L., and Karen A. Bjorndal. 2007. "Simulated Green Turtle Grazing Affects Nutrient Composition of the Seagrass *Thalassia Testudinum*." *Marine Biology* 150(6):1083–92. doi: 10.1007/s00227-006-0427-9.
- Morris, E. Kathryn, Tancredi Caruso, François Buscot, Markus Fischer, Christine Hancock, Tanja S. Maier, Torsten Meiners, Caroline Müller, Elisabeth Obermaier, Daniel Prati, Stephanie A. Socher, Ilja Sonnemann, Nicole Wäschke, Tesfaye Wubet, Susanne Wurst, and Matthias C. Rillig. 2014. "Choosing and Using Diversity Indices: Insights for Ecological Applications from the German Biodiversity Exploratories." *Ecology and Evolution* 4(18):3514–24. doi: 10.1002/ece3.1155.
- Musa, Muhammad, Uun Yanuhar, and Soemarno. 2016. "Relationship Pattern of Soil and Water Quality in Sustaining Natural Feed Stocks and the Life of Milkfish, *Chanos Chanos* (Forsskal, 1775): The Case Relationship Pattern of Soil and Water Quality in Sustaining Natural Feed Stocks and the Life of



- Milkfi." *American Journal of Environmental Sciences* 12(1):40–47. doi: 10.3844/ajessp.2016.40.47.
- Mycielska-DowgiałŁo, Elzbieta, and MaŁgorzata Ludwikowska-Kedzia. 2011. "Alternative Interpretations of Grain-Size Data from Quaternary Deposits." *Geologos* 17(4):189–203. doi: 10.2478/v10118-011-0010-9.
- Ningsih, Nining Sari, Farrah Hanifah, and Amelia Mustika Kusmarani. 2018. "Peranan Dinamika Oseanografi Dalam Pengelolaan Sumber Daya Perikanan." *JFMR-Journal of Fisheries and Marine Research* 2(2):116–27.
- Nono, Davidson Rato, Farnis B. Boneka, and Grevo S. Gerung. 2014. "Siput Gastropoda Pada Alga Makro Di Tanjung Arakan Dan Pantai Pulau Nain Provinsi Sulawesi Utara." *Jurnal Perikanan Dan Kelautan Tropis* (May).
- Nowicki, Robert J., James W. Fourqurean, and Michael R. Heithaus. 2018. *The Role of Consumers in Structuring Seagrass Communities: Direct and Indirect Mechanisms*. Springer International Publishing.
- Nugroho, Septriono Hari, and Purna Sulastya Putra. 2019. "Karakteristik Sebaran Besar Butir Endapan Pantai Pulau Sumba , Nusa Tenggara Timur Berdasarkan Data Ukuran Butir Dan Geokimia." *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral* 20(3):153–64.
- Nur Amalina, Abdul Latiff, Harun Fatimah Noor, Ahmad Mohd Fadhli, and Abdullah Ilyani. 2015. "Wave Prediction Model to Study on the Wave Height Variation in Terengganu Coast Of Malaysia." *International Journal of Scientific and Technology Research* 4(09):52–57.
- Papenbrock, Jutta. 2012. "Highlights in Seagrasses ' Phylogeny , Physiology , and Metabolism : What Makes Them Special ?" *ISRN Botany* 2012:1–15. doi: 10.5402/2012/103892.
- Parsons, Chris T., Fereidoun Rezanezhad, David W. O'Connell, and Philippe Van Cappellen. 2017. "Sediment Phosphorus Speciation and Mobility under Dynamic Redox Conditions." *Biogeosciences* 14(14):3585–3602. doi: 10.5194/bg-14-3585-2017.
- Parthasarathy, P., G. Ramesh, S. Ramasamy, T. Arumugam, P. Govindaraj, S. Narayanan, and G. Jeyabal. 2016. "Sediment Dynamics and Depositional Environment of Coleroon River Sediments , Tamil Nadu , Southeast Coast of India." *Journal of Coastal Sciences* 3(2):1–7.
- Pasiega, R. 1957. "Texture as Characteristic of Clastic Deposition." *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist* 41(9):1952–84. doi: <https://doi.org/10.1306/0BDA594E-16BD-11D7-8645000102C1865D>.
- Pasiega, R. 1964. "Grain Size Representation by CM Patterns as a Geologic Tool." *Journal of Sedimentary Research* 34(4):830–47. doi: 10.1306/74d711a4-2b21-11d7-8648000102c1865d.
- Pasiega, R., and R. Byramjee. 1969. "Grain-Size Image of Clastic Deposits." *Sedimentology* 13(3–4):233–52. doi: 10.1111/j.1365-3091.1969.tb00171.x.
- Paul, Maïke. 2018. "The Protection of Sandy Shores – Can We Afford to Ignore the Contribution of Seagrass?" *Marine Pollution Bulletin* 134(May):152–59. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.08.012.
- Phillips, Helen E., Susan E. Wijffels, and Ming Feng. 2005. "Interannual Variability in the Freshwater Content of the Indonesian-Australian Basin." *Geophysical Research Letters* 32(3):1–5. doi: 10.1029/2004GL021755.
- Pielou, E. C. 1966. "The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Collections." *Journal of Theoretical Biology* 13(C):131–44. doi: 10.1016/0022-5193(66)90013-0.
- Pittman, Simon J., J. A. Wiens, J. Wu, and D. L. Urban. 2018. "Seascape Ecology and Landscape Ecology: Distinct, Related, and Synergistic. Perspectives on Seascape Ecology." Pp. 485–92 in *Seascape ecology and*



- landscape ecology: Distinct, related, and synergistic.*, edited by S. J. Pittman. Wiley Blackwell.
- Portillo, Eduardo. 2014. "Relation between the Type of Wave Exposure and Seagrass Losses (*Cymodocea Nodosa*) in the South of Gran Canaria (Canary Islands - Spain)." *Oceanological and Hydrobiological Studies* 43(1):29–40. doi: 10.2478/s13545-014-0114-2.
- Potemra, James T. 2005. "Indonesian through Flow Transport Variability Estimated from Satellite Altimetry." *Oceanography* 18(SPL.ISS. 4):98–107. doi: 10.5670/oceanog.2005.10.
- Potouroglou, Maria, James C. Bull, Ken W. Krauss, Hilary A. Kennedy, Marco Fusi, Daniele Daffonchio, Mwita M. Mangora, Michael N. Githaiga, Karen Diele, and Mark Huxham. 2017. "Measuring the Role of Seagrasses in Regulating Sediment Surface Elevation." *Scientific Reports* 7(1):1–11. doi: 10.1038/s41598-017-12354-y.
- Prasetyo, Lilik Budi. 2017. *Pendekatan Ekologi Lanskap Untuk Konservasi Biodiversitas*. Bogor: Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor.
- Priosambodo, Dody. 2014. "Sebaran Spasial Komunitas Lamun Di Pulau Bone Batang Sulawesi Selatan - Spatial Distribution of Seagrass Community in Bone Batang Island South Sulawesi." *Jurnal Sainsmat* 3(2):165–75.
- Priosambodo, Dody. 2016. "Kelimpahan Gastropoda Pada Habitat Lamun Berbeda Di Pulau Bone Batang Sulawesi Selatan." *Spermonde* 2(2):27–32.
- Purcell, Steven W., Yves Samyn, and Chantal Conand. 2012. *Commercially Important Sea Cucumber of the World*. Rome, Italy: FAO.
- Purvaja, R., R. Ramesh, A. Shalini, and Tim Rixen. 2008. "Biogeochemistry of Nitrogen in Seagrass and Oceanic Systems Biogeochemistry of Nitrogen in Seagrass and Oceanic." *Memoir Geological Society of India* 73(January):435–60.
- Purvaja, R., R. S. Robin, D. Ganguly, G. Hariharan, G. Singh, R. Raghuraman, and R. Ramesh. 2018. "Seagrass Meadows as Proxy for Assessment of Ecosystem Health." *Ocean and Coastal Management* 159(1 June):34–45. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2017.11.026.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan. 2005. *Laporan Pemetaan Geologi Bersistem Dan Potensi Energi Sumberdaya Mineral Perairan Muara Sungai Berau Kalimantan Timur*. Bandung: Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Rahmawati, S., A. Irawan, I. H. Supriyadi, and M. H. Azkab. 2014. *Panduan Monitoring Padang Lamun*. edited by M. Hutomo and A. Nontji. Jakarta: Coral Reef Information and Training Center (CRITC) Coral Reef Rehabilitation and Management Program (COREMAP) Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI).
- Ramage, C. S. 1968. "Role of a Tropical 'Maritime Continent' in the Atmospheric Circulation 1." *Monthly Weather Review* 96(6):365–70. doi: 10.1175/1520-0493(1968)096<0365:roatmc>2.0.co;2.
- Ramage, C. S. 1971. *Monsoon Meteorology*. Academic Press.
- Rani, Chair, Budimawan, and Rohani Ambo-Rappe. 2009. "KEBERHASILAN EKOLOGI DARI PENCIPTAAN HABITAT DENGAN LAMUN BUATAN: PENILAIAN PADA KOMUNITAS IKAN." Pp. 1–14 in *Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT) ISOI 2009*.
- Rasheed, Michael A., Kara R. Dew, Len J. McKenzie, Robert G. Coles, Simon P. Kerville, and Stuart J. Campbell. 2008. "Productivity, Carbon Assimilation and Intra-Annual Change in Tropical Reef Platform Seagrass Communities of the Torres Strait, North-Eastern Australia." *Continental Shelf Research* 28(16):2292–2303. doi: 10.1016/j.csr.2008.03.026.



- Rattanachot, Ekkalak, and Anchana Prathep. 2016. "The Effect of Increasing Seagrass Root Complexity and Redox Potential on the Population of *Pillucina Vietnamica* ( *Bivalvia*: *Lucinidae* ) in Southwestern Thailand." *Molluscan Research* (June):11. doi: 10.1080/13235818.2015.1128587.
- Raz-Guzman, Andrea, and Raymond E. Grizzle. 2001. "Techniques for Quantitative Sampling of Infauna and Small Epifauna in Seagrass." Pp. 237–53 in *Global Seagrass Research Methods*, edited by F. T. Short and R. G. Coles. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V.
- Risjani, Yenny. 1999a. "An Investigation of Reverse and Transport of Nitrogen along the Thallus of *Euchema*." *Agritek* 7(4):69–73.
- Risjani, Yenny. 1999b. "Physiology of Nutrien in Indonesian Marine Algae : Variation in and Tissue Nitrogen Internal *Eucheuma Cottonii* in Relation to Environmental Nitrogen and Culture, Rep. Of Indonesia." *LPPM UB*.
- Rizqydiani, M., M. S. Ismet, and D. G. Bengen. 2018. "Diversity of Meiofauna and Its Association to Seagrass Beds Characteristics in Pramuka Island, Seribu Islands." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 176(1). doi: 10.1088/1755-1315/176/1/012045.
- Robertson, Andrew W., Vincent Moron, Jian-Hua Qian, Chih-Pei Chang, Fredolin Tangan, Edwin Aldrian, Tieh Yong Koh, and Juneng Liew. 2011. "The Maritime Continent Monsoon." Pp. 85–98 in, edited by CP Chang, Y. Ding, N. Lau, R. Johnson, B. Wang, and T. Yasunari. World Scientific Publishing.
- Roem, Muhamad. 2013a. "Kajian Kemampuan Padang Lamun Pulau Derawan Dalam Penyediaan Makanan Penyu Hijau (*Chelonia Mydas*) Linnaeus, 1758." 134.
- Roem, Muhamad. 2013b. "Laju Produktifitas Biomassa Daun." *Jurnal Harpodon Borneo* 6(2):153–62.
- Roem, Muhamad, and Asbar Laga. 2014. "Struktur Komunitas Padang Lamun Pulau Derawan." *Jurnal Harpodon Borneo* 7(2):93–101.
- Roem, Muhamad, Asbar Laga, Ika Listina, Indrawati Rukmana, and Kiki Astriani. 2016. "Studi Parameter Oseanografi Fisik Perairan Pulau Derawan." *Jurnal Harpodon Borneo* 9(2):143–57.
- Romero, Javier, Kun-Seop Lee, Marta Pérez, Miguel. A. Mateo, and Teresa Alvocerro. 2006. "Chapter 9 Nutrients Dynamics in Seagrass Ecosystems." Pp. 227–54 in *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*, edited by A. W. D. Larkum, R. J. Orth, and C. M. Duarte. Dordrecht: Springer.
- Rudianto. 2014. "Analisis Restorasi Ekosistem Wilayah Pesisir Terpadu Berbasis Co-Management: Studi Kasus Di Kecamatan Ujung Pangkah Dan Kecamatan Bungah, Kabupaten Gresik." *Research Journal of Life Science* 1(1):54–67. doi: 10.21776/ub.rjls.2014.001.01.8.
- Rudianto, H. 2017. *Restorasi Ekosistem Pesisir*. Malang, Indonesia: UB Press.
- Rudianto, Rudianto, and Andik Isdianto. 2020. "Management of Sustainable Coastal Reclamation Areas: A Case Study of the Reclamation of Tering Bay in Batam Island, Indonesia." *Journal Of Aquaculture and Fish Health* 9(1):57–68. doi: 10.20473/jafh.v9i1. 15379.
- Rumhayati, Barlah. 2010. "Studi Senyawa Fosfat Dalam Sedimen Dan Air Menggunakan Teknik Diffusive Gradient in Thin Films (DGT)." *Jurnal Ilmu Dasar* 11(2):160–66.
- Rustam, Agustin, Dietrich G. Bengen, Zainal Arifin, and Jonson L. Gaol. 2014. "Dinamika Dissolved Inorganic Carbon (Dic) Di Ekosistem Lamun Pulau Pari." *Jurnal Segara* 10(1). doi: 10.15578/segara.v10i1.13.
- Rustam, Agustin, Yusmiana Puspita, Rahayu Ningsih, Devi Dwiyantri Suryono, August Daulat, and Hadwijaya Lesmana Salim. 2019. "Struktur Komunitas Lamun Perairan Dynamics of Seagrass Community Structure Karimunjawa



- Archipelago Coastal Water , Jepara Regency.” *Jurnal Kelautan Nasional* 14(3):179–90. doi: <http://dx.doi.org/10.15578/jkn.v14i3.7761>.
- Sahu. B. K. 1964. “Depositional Mechanisms from the Size Analysis of Clastic Sediments.” *SEPM Journal of Sedimentary Research* Vol. 34(1). doi: 10.1306/74d70fce-2b21-11d7-8648000102c1865d.
- Saleh, Ejria, Jessie Beliku, Than Aung, and Awnesh Singh. 2010. “Wave Characteristics in Sabah Waters.” *American Journal of Environmental Sciences* 6(3):219–23. doi: 10.3844/ajessp.2010.219.223.
- Sambah, Abu Bakar, Trisnanda Devi Oktavia, Denny Wijaya Kusuma, Fenni Iranawati, Nurin Hidayati, and Adi Wijaya. 2020. “Oceanographic Variability and Its Influence on Pelagic Fish Catch in the Bali Strait.” *Berkala Penelitian Hayati* 26(1):8–16. doi: 10.23869/bphjbr.26.1.20202.
- Sanil Kumar, V., C. Sajiv Philip, and T. N. Balakrishnan Nair. 2010. “Waves in Shallow Water off West Coast of India during the Onset of Summer Monsoon.” *Annales Geophysicae* 28(3):817–24. doi: 10.5194/angeo-28-817-2010.
- Saragih, R. M., R. Fajarianti, and P. A. Winarso. 2018. “Atmospheric Study of the Impact of Borneo Vortex and Madden-Julian Oscillation over Western Indonesian Maritime Area Atmospheric Study of the Impact of Borneo Vortex and Madden-Julian Oscillation over Western Indonesian Maritime Area.” Pp. 1–12 in *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 997 (2018) 012004, *Seminar Nasional Fisika (SNF) (2017)*.
- Sartimbul, A, E. Rohadi, D. Yona, H. E. Yuli, A. B. Sambah, and J. Arleston. 2018. “Change in Species Composition and Its Implication on Climate Variation in Bali Strait : Case Study in 2006 and 2010.” *Journal of Survey in Fisheries Sciences* 4(2):38–46.
- Sartimbul, Aida, Hideaki Nakata, Erfan Rohadi, H. Julinda Sari, M. Najib, S. Alisafira, S. N. Ikhsani, and D. Listyaningsih. 2018. “Water Temperature Variation of Segara Anakan, Sempu Island, South Malang, Indonesia in Relation to the Climate Variation.” Pp. 1–10 in *MSAT*. IOP Publishing.
- Sartimbul, Aida, Hideaki Nakata, Erfan Rohadi, Beni Yusuf, and Hanggar Prasetyo. 2010. “Variations in Chlorophyll-a Concentration and the Impact on Sardinella Lemuru Catches in Bali Strait , Indonesia.” *Progress in Oceanography* 87(1–4):168–74. doi: 10.1016/j.pocean.2010.09.002.
- Satari, S. Z., Y. Z. Zubairi, A. G. Hussin, and S. F. Hassan. 2015. “Some Statistical Characteristic of Malaysian Wind Direction Recorded at Maximum Wind Speed: 1999-2008.” *Sains Malaysiana* 44(10):1521–30. doi: 10.17576/jsm-2015-4410-18.
- Schick, M. 1953. “Die Geographische Verbreitung Der Monsuns.” *Nova Acta Leopoldina* 16(12).
- Semedi, B., and F. Rahmawan. 2016. “Estimation of Stress Levels of Coral Reefs Bleaching Using Night-Time Satellite Data : A Case Study of Indonesian Tropical Waters.” *Nature Environment and Pollution Technology* 15(1):297–300.
- Semedi, Bambang, and Ratih Dewanti Dimyati. 2009. “Study of Ahort Mackerel Catch, Sea Surface Temperature, and Chlorophyll-a in the Makassar Straits.” *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences* 6:77–84. doi: 10.30536/ijreses.2009.v6.a1241.
- Semedi, Bambang, Badrul Huda Husain, and Nurin Hidayati. 2016. “Analyzing Coastal Vulnerability Index Using Integrated Satellite Remote Sensing and Geographic Information System : A Case Study of Denpasar Coastal Zone.” *Journal of Applied Enviromental and Biological Sciences* 6(4):35–40.
- Semedi, Bambang, and Nur Maulida Safitri. 2015. “Estimasi Distribusi Klorofil-A



- Di Perairan Selat Madura Menggunakan Data Citra Satelit Modis Dan Pengukuran In Situ Pada Musim Timur." *Research Journal of Life Science* 02(01):40–49.
- Seymour, J. R., B. Laverock, D. A. Nielsen, and P. I. Macreadie. 2018. *The Microbiology of Seagrasses*. Springer International Publishing.
- El Shaffai, Amgad. 2011. *Field Guide to Seagrasses of the Red Sea*. edited by A. Rouphael and A. Abdulla. Gland Switzerland: IUCN.
- Shannon, C. E. 1948. "A Mathematical Theory of Communication." *Bell System Technical Journal* 27(4):623–56. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x.
- Sharmila, R. Venkatachalapathy, R. S. Kankara, M. Mugilarasan, and K. Gurumoorthi. 2015. "Wave Characteristics of Kakinada Coast During South-West and North-East Monsoon: Statistical and Spectral Approach." *International Journal of Oceanography and Marine Ecological System* 4(1):16–30. doi: 10.3923/ijomes.2015.16.30.
- Shelford, V. E. 1931. "Some Concepts of Bioecology." *Ecology* 12(3):455–67.
- Short, Frederick T., and Robert G. Coles. 2003. *Global Seagrass Research Methods*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Short, Frederick T., Len J. McKenzie, Robert G. Coles, Karen P. Vidler, and Jeffrey L. Gaeckle. 2006. "SeagrassNet Manual for Scientific Monitoring of Seagrass Habitat, Worldwide Edition." *Sensors (Peterborough, NH)* (August):75.
- Siddiq, Arif Mohammad, Tri Atmowidi, and Ibnul Qayim. 2016. "The Diversity and Distribution of Holothuroidea in Shallow Waters of Baluran National Park, Indonesia." *Biodiversitas* 17(1):55–60. doi: 10.13057/biodiv/d170108.
- Simões, Francisco J. M. 2014. "Shear Velocity Criterion for Incipient Motion of Sediment." *Water Science and Engineering* 7(2):183–93. doi: 10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.006.
- Simpson, E. H. 1949. "Measurement of Diversity." *Nature* 163:688. doi: 10.1038/163688a0.
- Siry, Hendra Yusran. 2013. "Pendekatan Bentang Laut (Seascape) Dalam Pengelolaan Kawasan Ekosistem Karang." Pp. 115–56 in *Coral Governance*, edited by V. P. Nikijuluw, L. Adrianto, and N. Januarini. Bogor Indonesia: IPB Press.
- Situmorang, R. .., and G. Burhan. 1995. "Peta Geologi Bersistem Indonesia Lembar 1918 Tanjung Redeb." 1.
- Soegianto, A. 1994. *Ekologi Kuantitatif Metode Analisis Populasi Komunitas*. Surabaya Indonesia: Usaha Nasional.
- Solihuddin, T., D. A. Utami, H. L. Salim, and J. Prihantono. 2019. "Sedimentary Environment of a Modern Carbonate Platform of Karimunjawa Islands, Central Java." *Indonesian Journal on Geoscience* 6(1):57–72. doi: 10.17014/ijog.6.1.57-72.
- Søndergaard, M. 2009. "Redox Potential Definitions and General Aspects." *Encyclopedia of Inland Waters* 852–59.
- Spalding, Mark D., Vera N. Agostini, Jake Rice, and Susie M. Grant. 2012. "Pelagic Provinces of the World: A Biogeographic Classification of the World's Surface Pelagic Waters." *Ocean and Coastal Management* 60:19–30. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2011.12.016.
- Spalding, Mark D., Helen E. Fox, Gerald R. Allen, Nick Davidson, Zach A. Ferdaña, Max Finlayson, Benjamin S. Halpern, Miguel A. Jorge, Al Lombana, Sara A. Lourie, Kirsten D. Martin, Edmund McManus, Jennifer Molnar, Cheri A. Recchia, and James Robertson. 2007. "Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas." *BioScience* 57(7):573–83. doi: 10.1641/B570707.



- Spellerberg, Ian F., and Peter J. Fedor. 2003. "A Tribute to Claude Shannon (1916 – 2001) and a Plea for More Rigorous Use of Species Richness , Species Diversity and the ' Shannon – Wiener ' Index." *Ecological Soundings* 12:177–79.
- Sprintall, Janet, and W. Timothy Liu. 2005. "Ekman Mass and Heat Transport in the Indonesian Seas." *Oceanography* 18(SPL.ISS. 4):88–97. doi: 10.5670/oceanog.2005.09.
- Stapel, Johan, Rahel Manuntun, and Marten A. Hemminga. 1997. "Biomass Loss and Nutrient Redistribution in an Indonesian *Thalassia Hemprichii* Seagrass Bed Following Seasonal Low Tide Exposure during Daylight." *Marine Ecology Progress Series* 148(1–3):251–62. doi: 10.3354/meps148251.
- Stewart, Harris B. 1958. "Sedimentary Reflections of Depositional." 42(I):2587–2618.
- Sturm, C. F., R. Mayhew, and B. R. Bales. 2006. "Chapter 2 Field and Laboratory Procedures." Pp. 9–32 in *The Mollusks: A Guide to Their Study, Collection, and Preservation*. Vol. I. Pittsburgh USA: American Malacological Society.
- Sturm, C. F., T. A. Pearce, and A. Valdés. 2006. *The Mollusks: A Guide to Their Study, Collection, and Preservation*. Vol. 4. Pittsburgh USA: American Malacological Society.
- Sudarshan, Shety A. 2018. "Essential Properties of Taxonomic Profiling Data, Reproducibility, Microbiome and Phyloseq BioC/R Packages." 33.
- Supari, Fredolin Tangang, Liew Juneng, and Edwin Aldrian. 2016. "Spatio-Temporal Characteristics of Temperature and Precipitation Extremes in Indonesian Borneo." Pp. 1–7 in *The 2016 UKM FST Postgraduate Colloquium*. Vol. 1784. AIP Conference Proceedings.
- Supono, and Ucu Yanu Arbi. 2010. "Struktur Komunitas Ekhinodermata Di Padang Lamun Perairan Kema, Sulawesi Utara." *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia* 36(3):329–42.
- Supriadi. 2012. "Stok Dan Neraca Karbon Komunitas Lamun Di Pulau Barrang Lompo Makassar." Institut Pertanian Bogor.
- Susetiono. 2004. *Fauna Padang Lamun Tanjung Merah Selat Lembeh*. Jakarta Indonesia: Pusat Penelitian Oseanografi LIPI.
- Suwarna, N., and B. Hermanto. 2007. "Berau Coal in East Kalimantan; Its Petrographics Characteristics and Depositional Environment." *Indonesian Journal on Geoscience* 2(4):191–206. doi: 10.17014/ijog.vol2no4.20071.
- Syahidah, Muhshonati, Zadrach L. Dupe, and Edwin Aldrian. 2015. "Keterkaitan Borneo Vortex Dengan Curah Hujan Di Benua Maritim." *Indonesian Undergraduate Research Journal for Geoscience* 2(July):1–9.
- Tarya, A. 2018. *River Plume Spreading on a Tropical Continental Shelf Semi-Insulated by Coral Reefs*.
- Tarya, A., A. J. F. Hoitink, and M. Van Der Vegt. 2010. "Tidal and Subtidal Flow Patterns on a Tropical Continental Shelf Semi-Insulated by Coral Reefs." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 115(9):1–16. doi: 10.1029/2010JC006168.
- Tarya, A., A. J. F. Hoitink, M. Van der Vegt, M. M. van Katwijk, B. W. Hoeksema, T. J. Bouma, L. P. M. Lamers, and M. J. A. Christianen. 2018. "Exposure of Coastal Ecosystems to River Plume Spreading across a Near-Equatorial Continental Shelf." *Continental Shelf Research* 153(March 2016):1–15. doi: 10.1016/j.csr.2017.12.003.
- Tarya, A., M. van der Vegt, and A. J. F. Hoitink. 2015. "Wind Forcing Controls on River Plume Spreading on a Tropical Continental Shelf." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120:16–35. doi: 10.1002/2014JC010456. Received.



- Taufiqurrahman, Edwards, A'an J. Wahyudi, and Yukio Masumoto. 2020. "The Indonesian Throughflow and Its Impact on Biogeochemistry in the Indonesian Seas." *ASEAN Journal on Science and Technology for Development* 37(1):29–35. doi: 10.29037/AJSTD.596.
- Thibault de Chanvalon, A., A. Mouret, J. Knoery, E. Geslin, O. Péron, and E. Metzger. 2016. "Manganese, Iron and Phosphorus Cycling in an Estuarine Mudflat, Loire, France." *Journal of Sea Research* 118(October):92–102. doi: 10.1016/j.seares.2016.10.004.
- Tjasyono, Bayong. 2012. *Meteorologi Indonesia Volume I*. Vol. I. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Tokarz, Ewelina, and Danuta Urban. 2015. "Soil Redox Potential and Its Impact on Microorganisms and Plants of Wetlands." *Journal of Ecological Engineering* 16(3):20–30. doi: 10.12911/22998993/2801.
- Tomascik, T., A. ... Mah, A. Nontji, and M. ... Moosa. 1997. *The Ecology of Indonesian Seas*. Vol. VIII. Periplus Publishing.
- Tossin, and Kadir. 1996. "Tossin, S. Dan Kadir, R., 1996. Tipe Reservoir Sedimen Miosen Tengah Di Sub-Cekungan Tarakan, Cekungan Tarakan, Kalimantan Timur. Proceeding of the 25th Annual Convention of The Indonesian Association of Geologist, Pp. 495-512." 1996.
- Triatmodjo, Bambang. 2008. *Teknik Pantai*. Yogyakarta Indonesia: Penerbit Beta Offset.
- Triatmodjo, Bambang. 2009. *Perencanaan Pelabuhan*. Beta Offset.
- van Tussenbroek, B. I., Jan Arie Vonk, Johan Stapel, P. L. A. Erftemeijer, Jack J. Middelburg, and Jay C. Zieman. 2006. "The Biology of Thalassia: Paradigms and Recent Advances in Research." Pp. 409–39 in *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*, edited by A. W. D. Larkum, R. J. Orth, and C. M. Duarte. Dordrecht: Springer.
- Van Tussenbroek, Brigitta I., L. Veronica Monroy-Velazquez, and Vivianne Solis-Weiss. 2012. "Meso-Fauna Foraging on Seagrass Pollen May Serve in Marine Zoophilous Pollination." *Marine Ecology Progress Series* 469(November 2012):1–6. doi: 10.3354/meps10072.
- Van Tussenbroek, Brigitta I., Nora Villamil, Judith Márquez-Guzmán, Ricardo Wong, L. Verónica Monroy-Velázquez, and Vivianne Solis-Weiss. 2016. "Experimental Evidence of Pollination in Marine Flowers by Invertebrate Fauna." *Nature Communications* 7(September). doi: 10.1038/ncomms12980.
- Tuwo, Ambo. 2011. *Pengelolaan Ekowisata Pesisir Dan Laut: Pendekatan Ekologi, Sosial-Ekonomi, Kelembagaan, Dan Sarana Wilayah*. Briliant Internasional.
- Tuwo, Ambo, and Joeaharnani Tresnati. 1994. "Pengaruh Variasi Suhu Dan Spasial Terhadap Biologi Reproduksi Makrobenthos Holothuria Forskali." *Torani* 4(4):22–30.
- Tuwo, Ambo, and Joeaharnani Tresnati. 2015. "Sea Cucumber Farming in Southeast Asia (Malaysia, Philippines, Indonesia, Vietnam)." Pp. 331–52 in *Echinoderm Aquaculture*, edited by N. P. Brown and S. D. Eddy. New Jersey: Wiley Blackwell.
- Tuya, Fernando, Mathew A. Vanderklift, Thomas Wernberg, and Mads S. Thomsen. 2011. "Gradients in the Number of Species at Reef-Seagrass Ecotones Explained by Gradients in Abundance." *PLoS ONE* 6(5):1–7. doi: 10.1371/journal.pone.0020190.
- Udden, Johan August. 1914. "Bulletin of the Geological Society of America: Mechanical Composition Composition of Clastic Sediments." *Geological Society of America Bulletin* 25(1):655–744.



- Unsworth, Richard K. F. 2007. "Aspect of the Ecology of Indo-Pacific Seagrass System." University of Essex.
- Unsworth, Richard K. F., Rohani Ambo-Rappe, Benjamin L. Jones, Yayu A. La Nafie, A. Irawan, Udhi E. Hernawan, Abigail M. Moore, and Leanne C. Cullen-Unsworth. 2018. "Indonesia's Globally Significant Seagrass Meadows Are under Widespread Threat." *Science of the Total Environment* 634:279–86. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.315.
- Unsworth, Richard K. F., Catherine J. Collier, Gideon M. Henderson, and Len J. McKenzie. 2012. "Tropical Seagrass Meadows Modify Seawater Carbon Chemistry: Implications for Coral Reefs Impacted by Ocean Acidification." *Environmental Research Letters* 7(2):1–9. doi: 10.1088/1748-9326/7/2/024026.
- Unsworth, Richard K. F., Samantha L. Garrard, Pelayo Salinas De León, Leanne C. Cullen, David J. Smith, Katherine A. Sloman, and James J. Bell. 2009. "Structuring of Indo-Pacific Fish Assemblages along the Mangrove-Seagrass Continuum." *Aquatic Biology* 5(1):85–95. doi: 10.3354/ab00139.
- Unsworth, Richard K. F., Sammyde de Grave, and Laura Y. D. Goulding. 2010. "Influence of Environmental Cycles upon a Seagrass Caridean Shrimp Assemblage." *Raffles Bulletin of Zoology* 58(2):349–55.
- Unsworth, Richard K. F., Pelayo Salinas De León, Samantha L. Garrard, Jamaluddin Jompa, David J. Smith, and James J. Bell. 2008. "High Connectivity of Indo-Pacific Seagrass Fish Assemblages with Mangrove and Coral Reef Habitats." *Marine Ecology Progress Series* 353(May 2014):213–24. doi: 10.3354/meps07199.
- USACE. 2008. "Chapter 2 Meteorology and Wave Climate." P. 72 in *Coastal Engineering Manual*. Vol. 1100. Washington: US Army Corps of Engineers.
- USACE. 2015. *Coastal Engineering Manual – Part II (Change 4)*. Vol. 1100. Washington: US Army Corps of Engineers.
- Vonk, J. Arie, Fee O. H. Smulders, Marjolijn J. A. Christianen, and Laura L. Govers. 2017. "Seagrass Leaf Element Content: A Global Overview." *Marine Pollution Bulletin* (March):0–1. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.066.
- Vonk, Jan Arie, Marjolijn J. A. Christianen, and Johan Stapel. 2008. "Redefining the Trophic Importance of Seagrasses for Fauna in Tropical Indo-Pacific Meadows." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 79(4):653–60. doi: 10.1016/j.ecss.2008.06.002.
- Vonk, Jan Arie, Marjolijn J. A. Christianen, and Johan Stapel. 2010. "Abundance, Edge Effect, and Seasonality of Fauna in Mixed-Species Seagrass Meadows in Southwest Sulawesi, Indonesia." *Marine Biology Research* 6(3):282–91. doi: 10.1080/17451000903233789.
- Vonk, Jan Arie, Dominik Kneer, Johan Stapel, and Harald Asmus. 2008. "Shrimp Burrow in Tropical Seagrass Meadows: An Important Sink for Litter." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 79(1):79–85. doi: 10.1016/j.ecss.2008.03.003.
- Vonk, Jan Arie, Jack J. Middelburg, Johan Stapel, and Tjeerd J. Bouma. 2008. "Dissolved Organic Nitrogen Uptake by Seagrasses." *Limnology and Oceanography* 53(2):542–48. doi: 10.4319/lo.2008.53.2.0542.
- De Voogd, Nicole J., Leontine E. Becking, and Daniel F. R. Cleary. 2009. "Sponge Community Composition in the Derawan Islands, NE Kalimantan, Indonesia." *Marine Ecology Progress Series* 396:169–80. doi: 10.3354/meps08349.
- Wang, Bin. 2006. *The Asian Monsoon*. Berlin, New York: Springer Verlag, Heidelberg.
- Waycott, Michelle, Edward Biffin, and Donald H. Les. 2018. "Systematics and



- Evolution of Australian Seagrasses in a Global Context." Pp. 129–54 in *Seagrasses of Australia: Structure, Ecology and Conservation*.
- Waycott, Michelle, Catherine Collier, Kathryn McMahon, Peter Ralph, Len McKenzie, James Udy, and Alana Grech. 2008. "Supporting Information; Vulnerability of Seagrasses in the Great Barrier Reef to Climate Change. Part II." Pp. 194–236 in *Climate Change and the Great Barrier Reef: A Vulnerability Assessment. part II: Species and Species Groups*.
- Waycott, Michelle, K. McMahon, Jane Mellors, Ainsley Calladine, and Diana Kleine. 2004. *A Guide to Tropical Seagrasses of the Indo-West Pacific*. Townsville: James Cook University.
- Waycott, Michelle, Kathryn McMahon, Jane Mellors, Ainsley Calladine, and Diana Kleine. 2004. *A Guide to Tropical Seagrasses of the Indo-West Pacific*. Queensland Australia: James Cook University.
- Webster, Peter J. 2005. "17 . Oceans and Monsoons." Pp. 253–98 in *The Global Monsoon System: Research and Forecast*, edited by C. P. Chang, B. Wang, and N.-C. G. Lau. Geneva Switzerland: World Meteorological Organization.
- Wei, Jun, M. T. Li, P. Malanotte-Rizzoli, A. L. Gordon, and D. X. Wang. 2016. "Opposite Variability of Indonesian Throughflow and South China Sea Throughflow in the Sulawesi Sea." *Journal of Physical Oceanography* 46(10):3165–80. doi: 10.1175/JPO-D-16-0132.1.
- Wentworth, Chester K. 1922. "A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments." *The Journal of Geology* 30(5):377–92. doi: 10.1086/622910.
- Werorilangi, Shinta, Muh Farid Samawi, Rastina, Akbar Tahir, Ahmad Faizal, and Arniati Massinai. 2016. "Bioavailability of Pb and Cu in Sediments of Vegetated Seagrass, Enhalus Acoroides, from Spermonde Islands, Makassar, South Sulawesi, Indonesia." *Research Journal of Environmental Toxicology* 10(2):126–34. doi: 10.3923/rjet.2016.126.134.
- White, Easton R., and Alan Hastings. 2020. "Seasonality in Ecology: Progress and Prospects in Theory." *Ecological Complexity* 44:2–15. doi: 10.1016/j.ecocom.2020.100867.
- Widén, Britta. 1996. "Nitrification and Denitriification in Seagrass Communities in Chwaka Bay , Zanzibar." Uppsala University.
- Wight, A.W.R., Hare, L.H., Reynolds, J. R. 1993. "Tarakan Basin, NE Kalimantan, Indonesia: A Century of Exploration and Future Hydrocarbon Potential." *Bulletin of the Geological Society of Malaysia* 33:263–88. doi: 10.7186/bgsm33199319.
- Wijaya, Adi, Umi Zakiyah, Abu Bakar Sambah, and Daduk Setyohadi. 2020. "Spatio-Temporal Variability of Temperature and Chlorophyll-a Concentration of Sea Surface in Bali Strait, Indonesia." *Biodiversitas* 21(11):5283–90. doi: 10.13057/biodiv/d211132.
- Williams, Caroline M., Gregory J. Ragland, Gustavo Betini, Lauren B. Buckley, Zachary A. Cheviron, Kathleen Donohue, Joe Hereford, Murray M. Humphries, Simeon Lisovski, Katie E. Marshall, Paul S. Schmidt, Kimberly S. Sheldon, Øystein Varpe, and Marcel E. Visser. 2017. "Understanding Evolutionary Impacts of Seasonality: An Introduction to the Symposium." *Integrative and Comparative Biology* 57(5):921–33. doi: 10.1093/icb/ix122.
- Wirjohamidjojo, Soerjadi, and Sugarin Sugarin. 2008. *Praktek Meteorologi Kelautan*. BMKG.
- Wirjohamidjojo, Soerjadi, and Yunus Swarinoto. 2010. *Iklim Kawasan Indonesia (Dari Aspek Dinamik - Sinoptik)*. Jakarta Indonesia: BMKG.
- World Meteorological Organization. 1998. *Guide to Wave Analysis*. Vol. 1998. Second Edi. Geneva Switzerland: World Meteorological Organization.
- World Meteorological Organization. 2008. "Measurement of Surface Wind." Pp.



- 167–83 in *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. World Meteorological Organization.
- Wyrski, Klaus. 1961a. *Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters, in Scientific Results of Maritime Investigations of the South China Sea and Gulf of Thailand 1959-1961*. Vol. 2. University of California, Scripps Institution of Oceanography.
- Wyrski, Klaus. 1961b. "Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters. Naga Report Volume 2. Scientific Results of Marine Investigation of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959-1961." *Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters. Naga Report Volume 2. Scientific Results of Marine Investigation of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959-1961* 2:195.
- Wyrski, Klaus. 1987. "Indonesian through Flow and the Associated Pressure Gradient." *Journal of Geophysical Research* 92(C12):12941. doi: 10.1029/jc092ic12p12941.
- Wyrski, Klaus. 2005. "Discovering the Indonesian Throughflow." *Oceanography* 18(SPL.ISS. 4):28–29. doi: 10.5670/oceanog.2005.02.
- Yona, D., Aida Sartimbul, Hideaki Nakata, Erfan Rohadi, and Ruly Isfatul Khasanah. 2017. "Seasonal Variation of Omega-3 Content from Bali Sardines Catch in Bali Strait and Its Drivers." P. 235 in *International Symposium Drivers of Dynamics of Small Pelagic Fish Resources*.
- York, Paul H., Glenn A. Hyndes, Melanie J. Bishop, and Richard S. K. Barnes. 2018. "Faunal Assemblages of Seagrass Ecosystems." Pp. 541–88 in *Seagrasses of Australia Structure, Ecology and Conservation*. Springer International Publishing.
- Yunianta, Yenny Risjani, René Perez, Raymond Kaas, and Jean Michel Robert. 1995. "Stockage de l'azote Chez Laminaria Digitata Cultivée En Eau de Mer Enrichie: L'effet Du Dosage et Du Temps d'incubation." *Acta Botanica Gallica* 142(2):153–59. doi: 10.1080/12538078.1995.10515703.
- Yusron, Eddy. 2013. "Biodiversitas Fauna Ekhinodermata (Holothuroidea, Echinoidea, Asteroidea Dan Ophiuroidea) Di Perairan Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat." *Zoo Indonesia* 22(1):1–10.
- Yusuf, Syafyudin, Magdalena Litaay, Andi Niartiningasih, Budimawan, and Fatmawati. 2006. "SPAWNING OF THE TOPSHELL (Trochus Niloticus L.) USING DIFFERENT INDUCE METHODS." *Torani* 16(5):403–8.
- Zakiah, U., and E. Y. Herawati. 2015. "Assessment of Trophic Status in Bali Strait." *Research Journal of Life Science* 02(03):189–98.
- Zhang, Ningning, Ming Feng, Yan Du, Jian Lan, and Susan E. Wijffels. 2016. "Journal of Geophysical Research: Oceans." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121(8):4716–31. doi: 10.1002/2016JC011854.
- Zieman, J. C., and R. T. Zieman. 1989. "The Ecology of the Seagrass Meadows of the West Coast of Florida: A Community Profile." *Biological Report - US Fish & Wildlife Service* 85(7 .25).